

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

INFLUENCE DES ADJUVANTS CHIMIQUES SUR LA PERFORMANCE DES MORTIER DE BETON EQUIVALENT À RHÉOLOGIE ADAPTÉE

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Jing PAN

Jury : Kamal. H. Khayat (directeur)
Ammar Yahia (rapporteur)
Nikola Mikanovic

Sherbrooke (Québec) Canada

Avril 2011

14-2141



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-83743-6

Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-83743-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

À ma mère, à mon père

RÉSUMÉ

Les bétons fluides à rhéologie adaptée représentent une nouvelle génération de bétons à hautes performances. Ces bétons possèdent un faible seuil de cisaillement et une viscosité plastique similaire à celui du béton conventionnel. Pour concevoir un tel matériau, l'utilisation des adjuvants chimiques est indispensable, notamment, des superplastifiants, des agents de viscosité et des agents entraîneurs d'air.

De manière pragmatique, il s'avère nécessaire de comprendre les interactions entre différents types d'adjuvants et de développer une base de données qui sera d'une grande utilité dans la phase de conception des matériaux cimentaires à rhéologie adaptée. Une méthode simple, la méthode mortier de béton équivalent (MBE), est proposée afin d'analyser rapidement les exigences d'efficacité des adjuvants chimiques et de maintien rhéologique et mécanique dans les matériaux cimentaires. Avec cette méthode, cinq compositions de mortier et les rapports eau / liant de 0,41 à 0,5 ont été utilisées. Les superplastifiants seuls, les combinaisons superplastifiants / agents de viscosité et les combinaisons superplastifiants / agents entraîneur d'air sont utilisées séparément dans le mortier afin d'étudier les effets de ces différentes combinaisons d'adjuvants chimique. Pour terminer, quelques validations du béton ont effectuées.

Les résultats obtenus sur les mortiers issus de différentes compositions de béton ont montré que : l'augmentation du dosage en superplastifiant peut diminuer le seuil et la viscosité plastique en même temps; l'incorporation d'agent de viscosité augmente la viscosité même s'il y a une augmentation du dosage en superplastifiant pour garder le même étalement. Le type du superplastifiant choisit est un facteur principal qui influence la rétention de maniabilité dans le temps; La résistance à la compression et la teneur en air possèdent une corrélation linéaire, les différences de la perte de résistance sur la teneur en air dépend du type de combinaison superplastifiant / agent entraîneur d'air employé.

Enfin, après les validations sur les bétons autoplacants pour la construction des bâtiments et les bétons de masse avec une fluidité identique au béton semi-autoplacant, les résultats de recherche démontrent que les effets des adjuvants chimiques sur les propriétés dans les bétons et leurs mortiers sont corrélés. Les phénomènes qui existent dans les mortiers peuvent se retrouver dans leur béton correspondant.

Mots-clés : béton fluide, rhéologie, superplastifiant, agent de viscosité, agent entraîneur d'air

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mes parents Jianhe PAN et Xiangyin ZHOU, et mon copain Olivier HU, qui n'ont pas eu beaucoup d'attention pendant ces années. Je vous remercie pour votre compréhension et votre soutien.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mon professeur, Kamal Henri Khayat, directeur du Groupe de recherche sur le ciment et le béton de l'Université de Sherbrooke, pour avoir dirigé ce mémoire. Son expérience et ses conseils sur le plan expérimental et scientifique m'ont permis d'avancer et d'apprendre toujours plus au long de ses deux années.

J'exprime mes remerciements à Nikola Mikanovic, qui a participé à enrichir mon expérience. Il m'a consacré de son temps pour les discussions et les corrections lors de la rédaction. Je tiens également à remercier Soo-Duck Hwang qui m'a accueillie, et m'a initiée aux bases du BAP et de la méthode MBE.

Je remercie mon professeur, Jean-Louis Gallias, ainsi que monsieur Sébastien Remond (Université de Cergy-pontoise, France) de m'avoir présenté et de me donner l'opportunité de travailler à l'Université de Sherbrooke. Ils m'ont aidé à faire mes premiers pas dans le monde de la rhéologie des matériaux cimentaires.

Je souhaite remercier toutes les personnes dans le Groupe de recherche sur le ciment et le béton qui m'ont aidé pour mes multiples analyses. Je remercie en particulier tous les techniciens, madame Ghislaine Luc, messieurs Rajko Vojnovic, Denis Bolduc, Sylvain Roy et Claude Faucher.

Finalement, je voudrais adresser mes profonds remerciements à Ingrid, Julie, Baudouin et tous mes amis à Sherbrooke pour leur encouragement, leur aide sur la langue française et ma vie quotidienne.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS	iii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	17
CHAPITRE 2 LITTÉRATURE	20
2.1 Ciment Portland.....	20
2.1.1 Composition	20
2.1.2 Hydratation du ciment.....	20
2.2 Superplastifiant (SP)	22
2.2.1 Fonction.....	22
2.2.2 Classement	23
2.2.3 Mode d'action	24
2.2.4 Effet sur la rhéologie	26
2.3 Agent viscosité (VEA)	26
2.3.1 Fonction.....	26
2.3.2 Classement	26
2.3.3 Mode d'action	27
2.3.4 Effet sur la rhéologie	27
2.4 Agent entraîneur d'air (AEA).....	27
2.4.1 Fonction.....	27
2.4.2 Classement	28
2.4.3 Mode d'action	28
2.4.4 Effet sur la rhéologie	29
2.5 Les combinaisons des adjuvants	29
2.5.1 Compatibilité entre le superplastifiant et le ciment.....	29
2.5.2 Compatibilité entre l'agent de viscosité et le ciment	32
2.5.3 Compatibilité entre l'agent entraîneur d'air et le ciment	32
2.5.4 Compatibilité entre les adjuvants	32
2.6 La rhéologie.....	35
2.6.1 Concepts de base de la rhéologie	35
2.6.2 Rhéomètre	37
2.6.3 Rhéologie des systèmes cimentaires	40
2.7 La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)	40
CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	43
3.1 Caractéristiques des matériaux.....	43
3.1.1 Ciment.....	43
3.1.2 Ajouts cimentaires.....	45
3.1.3 Granulats	45
3.1.4 Sable	48
3.1.5 Adjuvants	49
3.2 Formulation de chaque type de béton et de MBE	50
3.2.1 Types de béton et de MBE	50
3.2.2 Plan expérimental.....	51
3.3 Méthodologie	57
3.3.1 Séquence de malaxage	57
3.3.2 Test pour le MBE	57

3.3.3 Test pour le béton	58
CHAPITRE 4 Effet des superplastifiants sur les propriétés des mortiers de béton équivalents	61
4.1 Étude sur le MBE de BAP pour la construction des bâtiments (MBE-BAP-B)	61
4.1.1 Propriétés rhéologiques initiales	61
4.1.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	64
4.1.3 Ressuage forcé.....	67
4.1.4 Propriétés mécaniques.....	68
4.2 Étude sur MBE de BAP pour la préfabrication (MBE-BAP-P).....	69
4.2.1 Propriétés rhéologiques initiales	69
4.2.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	71
4.2.3 Ressuage forcé.....	74
4.2.4 Propriétés mécaniques.....	74
4.3 Étude sur le MBE de béton semi-autoplaçant pour infrastructure (MBE-BSAP).....	75
4.3.1 Propriétés rhéologiques initiales	75
4.3.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	78
4.3.3 Propriétés mécaniques.....	80
4.4 Discussions.....	81
4.4.1 Propriétés rhéologiques initiaux.....	81
4.4.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	84
4.4.3 Ressuage forcé.....	86
4.4.4 Propriétés mécaniques.....	86
4.5 Conclusions.....	87
CHAPITRE 5 Effet de la combinaison superplastifiant/agent viscosité sur les propriétés des mortiers de béton équivalents.....	89
5.1 Étude sur le MBE de BAP pour la construction des bâtiments (MBE-BAP-B)	89
5.1.1 Demande en superplastifiant (SP)	89
5.1.2 Propriétés rhéologiques initiales	90
5.1.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	92
5.1.4 Ressuage forcé.....	95
5.1.5 Propriétés mécaniques.....	96
5.2 Étude sur MBE de BAP pour la préfabrication (MBE-BAP-P).....	98
5.2.1 Demande en superplastifiant (SP)	98
5.2.2 Propriétés rhéologiques initiales	99
5.2.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	101
5.2.4 Ressuage forcé.....	104
5.2.5 Propriétés mécaniques.....	104
5.3 Étude sur le MBE du béton de masse avec une fluidité identique au BSAP (MBE-BSAP-BM)	106
5.3.1 Demande en superplastifiant (SP) et agent viscosité (VEA).....	106
5.3.2 Effet du SP/VEA sur la rétention de l'ouvrabilité dans le temps.....	111
5.3.3 Effet du SP/VEA sur le dégagement de chaleur	113
5.3.4 Effet du SP/VEA sur la résistance à la compression.....	114
5.4 Discussions.....	115
5.4.1 Demande en superplastifiant	115
5.4.2 Propriétés rhéologiques initiales	116
5.4.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	116

5.4.4 Ressuage forcé.....	117
5.4.5 Propriétés mécaniques.....	117
5.5 Conclusion.....	118
CHAPITRE 6 Effet de la combinaison superplastifiant/agent entraîneur d'air sur les propriétés des mortiers de béton équivalents	121
6.1 Étude sur le MBE de béton semi-autoplaçant (MBE-BSAP)	121
6.1.1 Teneur en air.....	121
6.1.2 Propriétés rhéologiques initiales	122
6.1.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	125
6.1.4 Propriétés mécaniques.....	128
6.2 Étude sur le MBE du béton de masse fluide (MBE-BMF)	131
6.2.1 Teneur en air.....	131
6.2.2 Propriétés rhéologiques initiales	132
6.2.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	134
6.2.4 Propriétés mécaniques.....	137
6.3 Discussion	140
6.3.1 Teneur en air.....	140
6.3.2 Propriétés rhéologiques initiaux.....	140
6.3.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	141
6.3.4 Propriétés mécaniques.....	141
6.4 Conclusion.....	142
CHAPITRE 7 Validation sur béton	144
7.1 Étude sur le BAP pour la construction des bâtiments (BAP-B).....	144
7.1.1 Demande en SP	144
7.1.2 Propriétés rhéologiques initiaux.....	146
7.1.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.....	147
7.1.4 Ségrégation statique	150
7.1.5 Propriétés mécaniques.....	151
7.2 Étude sur le Béton de Masse avec une fluidité identique au BSAP (BSAP-BM).....	153
7.2.1 Perte de la maniabilité	154
7.2.2 Perte de la teneur en air	155
7.2.3 Dégagement de chaleur	156
7.2.4 Résistance à la compression et module E.....	157
7.2.5 Résistance au gel-dégel	158
7.2.6 Résistance à l'écaillage	159
7.2.7 La perméabilité aux ions chlorures	161
7.2.8 Retrait au séchage.....	162
7.3 Conclusion.....	163
CHAPITRE 8 Conclusion	165
Liste des références	169
Annexe A.....	173

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La tendance actuelle dans le domaine des matériaux cimentaires, que ce soit au niveau de la conception, de la fabrication ou même des spécifications, est de promouvoir l'utilisation des bétons très fluides. Les bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA) représentent une nouvelle génération des bétons à haute performances. Ces bétons possèdent un faible seuil de cisaillement et une viscosité plastique similaire à celui du béton conventionnel. Ils peuvent s'écouler à travers les armatures les plus étroites sans nécessiter une consolidation mécanique (ou très peu) et remplir les coffrages sans risques de ségrégation. Ils peuvent être à la fois fluides et stables. Donc, ces types de béton permettent de réduire la durée et les coûts de construction, et ainsi, d'augmenter la cadence de production et la qualité des bétons préfabriqués et prêts à l'emploi.

L'utilisation des adjuvants chimiques dans les BFRA est indispensable; notamment, les superplastifiants (SP), les agents viscosités (VEA) et les agents entraîneurs d'air (AEA), pour concevoir un équilibre entre la fluidité et la stabilité à l'état frais, et pour les autres propriétés demandées selon les différentes applications. L'adjuvantation des bétons est devenue aujourd'hui une technique nécessaire et économique. Actuellement, la plupart des bétons contiennent plusieurs adjuvants et les clients exigent des formules de bétons robustes, c'est-à-dire que les adjuvants doivent être capables d'encaisser les variations normales des composants (ciments, ajouts cimentaires, etc.) et d'accepter des petites variations. La performance des adjuvants chimiques dans les matériaux cimentaires fortement adjuvantés dépend de leur compatibilité mutuelle, ainsi que de leur compatibilité avec le liant utilisé. Il nécessite de développer une grande base de données (sur les performances et les compatibilités des adjuvants) qui sera utilisée lors de la phase de conception des bétons à rhéologie adaptée.

Afin de développer et de promouvoir les BFRA, un grand programme de recherche a été établie à l'Université de Sherbrooke. Ce mémoire portera précisément sur les influences des adjuvants chimiques dans les BFRA à haute performance.

Les objectifs spécifiques de l'étude présentée dans ce mémoire sont :

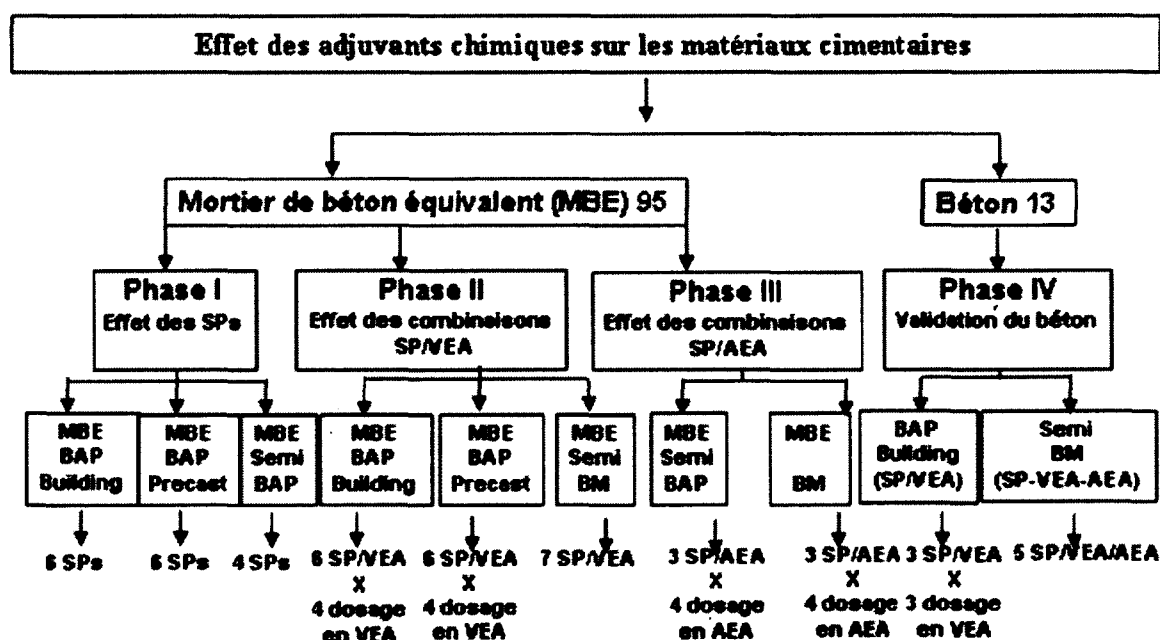
- Utiliser la méthode de mortier de béton équivalent (MBE) pour la mise au point des BFRA : béton autoplaçant pour la construction des bâtiments (BAP-B), béton autoplaçant pour la préfabrication (BAP-P), béton semi-autoplaçant (BSAP), et béton de masse avec une fluidité identique au béton semi-autoplaçant (BSAP-BM).
- Étudier les effets des adjuvants sur les caractéristiques rhéologiques des bétons et des mortiers.
- Analyser la compatibilité entre les adjuvants.
- Développer une base de données qui sera utilisée lors de la phase de conception des bétons à rhéologie adaptée.

Cette étude évalue le béton fluide à rhéologie adaptée ainsi que son mortier de béton équivalent pour des nouvelles combinaisons d'adjuvant. Ces travaux sont généralement requis pour analyser la performance des superplastifiants (SP) et leur compatibilité avec les autres adjuvants, telle que les agents de viscosité (VEA) et les agents entraîneur d'air (AEA). Comme les polycarboxylates (PC) sont une nouvelle génération de SP, il n'existe pas beaucoup de données sur l'effet de combinaisons de PC et d'autres adjuvants ou les liants, surtout en ce qui concerne les bétons fluides.

Dans le cadre de cette étude, la combinaison de différents adjuvants avec les SP sera entreprise afin d'analyser leur influence et leur compatibilité sur le comportement rhéologique et les propriétés mécaniques. Si les effets de ces combinaisons ne sont pas connus, alors la compatibilité des adjuvants doit être examinée expérimentalement avant de choisir des adjuvants pour un BFRA. Quatre phases réalisées sur MBE et le béton sont présentées dans la figure 1.1 :

- 1^{ère} phase : Évaluation des performances des différents superplastifiants sur le MBE.
- 2^e phase : Étude de compatibilité entre des combinaisons superplastifiants / agents de viscosité (SP/VEA) sur MBE.
- 3^e phase : Étude de compatibilité entre des combinaisons superplastifiants / agents entraîneur d'air (SP/AEA) sur MBE.
- 4^e phase : validation des résultats sur béton.

Ce mémoire est divisé en huit chapitres. Le chapitre 2 présente la littérature sur la rhéologie des matériaux cimentaires et l'utilisation des adjuvants dans les mélanges cimentaires. La description des choix des matériaux, les méthodologies et le plan expérimental sont traités dans le chapitre 3. Les chapitres 4, 5 et 6 comprennent l'analyse et les résultats de la performance de SP, la compatibilité SP/VEA et SP/AEA, les propriétés rhéologiques et les propriétés mécaniques. La validation des résultats sur les bétons autoplaçants pour la construction des bâtiments et les bétons de masse avec une fluidité identique au béton semi-autoplaçant est présentée dans le chapitre 7. Enfin, le chapitre 8 conclut les résultats généraux obtenus.



CHAPITRE 2

LITTÉRATURE

2.1 Ciment Portland

2.1.1 Composition

Les ciments Portlands sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques. Ils sont constitués par mélange et broyage à partir de clinker (une roche de synthèse élaborée à haute température dans le four), de gypse (sulfate de calcium CaSO_4) et d'autres additifs éventuels (laitiers, cendres volantes, filler calcaire, etc.). Le clinker contient un certain nombre de constituants, dont quatre constituants représentent 90 % ou plus de la masse du ciment : le silicate tricalcique (alite C_3S), le silicate bicalcique (bélite C_2S), l'aluminate tricalcique (C_3A) et l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) (Kosmatka et Kerkhoff, 2004).

Pendant les années 1990, la norme ASTM C1157 a établi les six types de ciments suivants :

- Type GU : Usage général
- Type HE : Haute résistance initiale
- Type MS : Résistance modérée aux sulfates
- Type HS : Résistance élevée aux sulfates
- Type MH : chaleur d'hydratation modérée
- Type LH : Faible chaleur d'hydratation

2.1.2 Hydratation du ciment

a) Réaction principale

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment, le C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

Après l'hydratation des silicates (C_3S et C_2S), il y a formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de portlandite ($Ca(OH)_2$). Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable.

L'hydratation des aluminates (C_3A et C_4AF) se produit en présence d'eau et de gypse. Ils forment rapidement de l'ettringite (AFt). Comme ce dernier devient instable, il se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (AFm) dans le temps.

La réaction avec l'eau des différentes phases minérales d'un ciment respecte l'ordre suivant : $C_3A > C_3S > C_2S \approx C_4AF$. L'hydratation du ciment présente les mêmes étapes que les deux phases les plus réactives (C_3A et C_3S). Elle est plus complexe du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent entre les différentes phases au cours du processus d'hydratation (Nonat, 2003).

b) Cinétique de l'hydratation

L'hydratation du ciment Portland implique la réaction des quatre phases minérales. La figure 2.1 présente la courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment qui peut se découper en quatre périodes. Ces périodes peuvent être décrites de la manière suivante (Garcia, 1999) :

- Période 1 (réactions initiales) : Cette période débute dès le contact eau-ciment et dure quelques minutes. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H.
- Période 2 (période dormante) : Le dégagement de chaleur est faible. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase. Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.
- Période 3 (période d'accélération) : Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution dévient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créant donc un solide.
- Période 4 (période de ralentissement) : Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. C'est pendant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm.

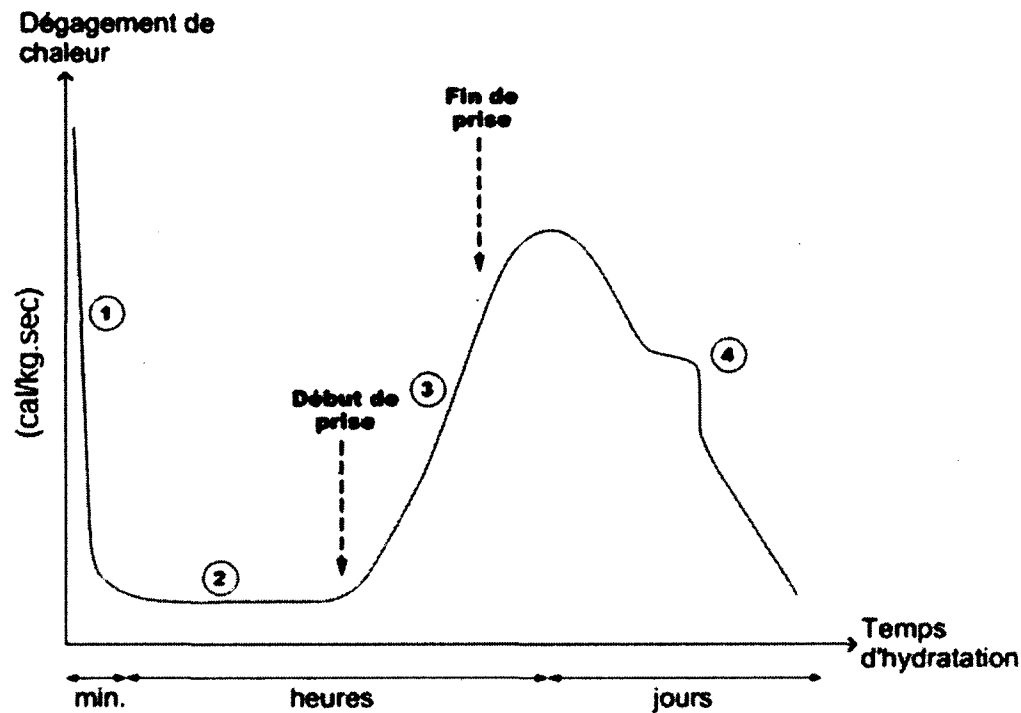


Figure 2.1 : Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un ciment (Garcia, 1999)

2.2 Superplastifiant (SP)

2.2.1 Fonction

La quantité d'eau nécessaire à la réaction chimique pour hydrater complètement ciment et pour provoquer sa prise, est faible : il suffit d'ajouter une quantité de l'ordre d'un dixième (1/10) du poids du ciment pour le faire prendre intégralement. Or cette faible quantité est insuffisante pour donner une pâte fluide (Mills, 1966) (Jensen et Hansen, 2001). Un grand de partie de l'eau est emprisonné entre les particules. Afin d'obtenir une maniabilité satisfaisante, les superplastifiants sont souvent utilisés. Ils permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats (figure 2.2). La défloculation et la dispersion des grains de ciment sont directement liées à l'adsorption des SP à la surface des particules. En effet, leur adsorption influence les caractéristiques physiques et chimiques des particules de ciment.

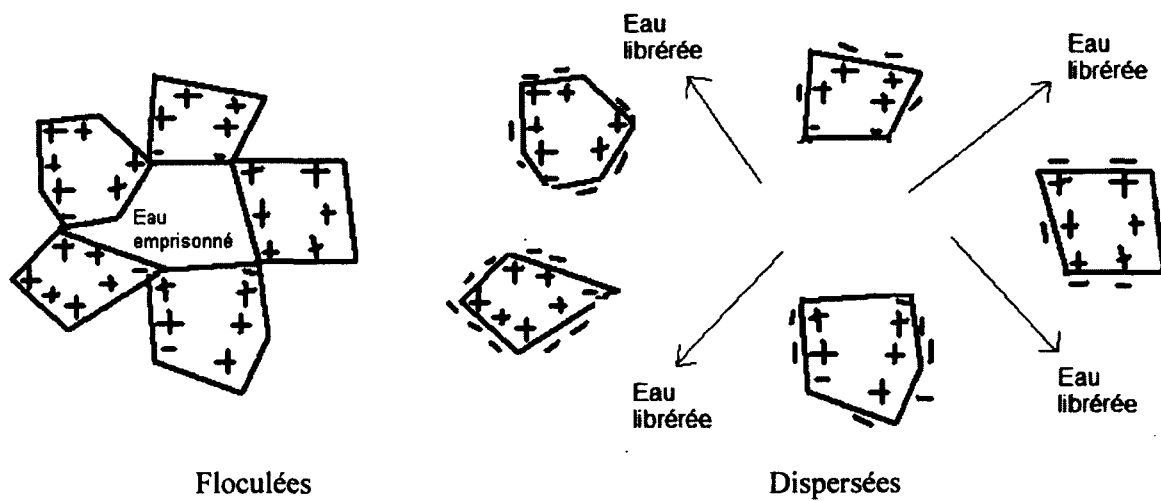


Figure 2.2 : Représentation des particules de ciment floculées et dispersées

2.2.2 Classement

Actuellement, il existe sur le marché deux principaux types de superplastifiant : le polynaphtalène sulfonate (PNS) et le polycarboxylate (PC). La première génération de SP, le PNS est apparu sur le marché il y a 35 années (Anonyme, 1984). La nouvelle génération de SP apparue sur le marché est de PC il y a 20 ans, dont l'utilisation est répandue en Amérique du Nord depuis les 10 dernières années. Différents types de SP présentent différentes structures (figure 2.3) qui induisent les différents modes d'action.

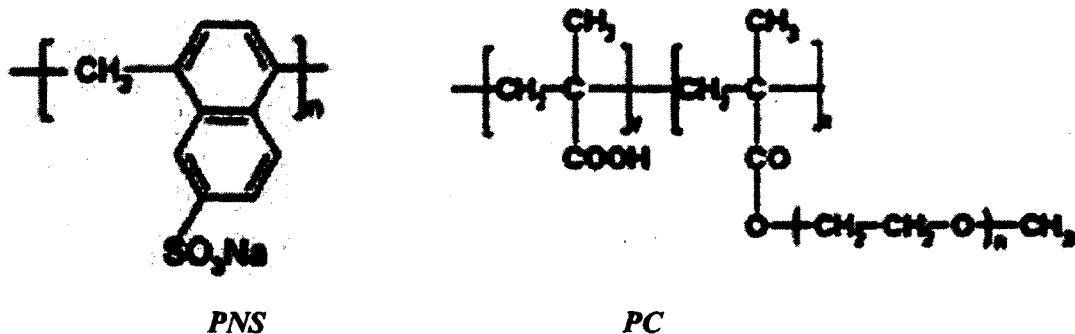


Figure 2.3 : Différentes structures de superplastifiants (Bedard et Mailvaganam 2006)

2.2.3 Mode d'action

Une fois les molécules de superplastifiant adsorbées à la surface des particules de ciment, deux effets peuvent être à l'origine de la dispersion :

a) Déglocculation par répulsion électrostatique (répulsion de charges)

Pour pouvoir interagir avec la surface des grains de ciment, les molécules fluidifiantes doivent être ionisées. On qualifie scientifiquement ces molécules de « polyélectrolytes » : les macromolécules de type polymère présentant des charges négatives sur toute la longueur de chaîne. De la même façon que deux aimants dont on rapproche les pôles de même magnétisme se repoussent, deux particules de ciment présentant à leur surface des polyélectrolytes vont s'écarter l'une par rapport à l'autre (figure 2.4).

On estime que la répulsion électrostatique est plutôt fréquente dans le cas de molécules de superplastifiant à structure linéaire. Ces molécules s'adsorbent « à plat » à la surface des grains de ciment, et du fait de la constante formation d'hydrates après le gâchage du béton, ces derniers recouvrent immédiatement les molécules de superplastifiants et de ce fait annulent rapidement leur action fluidifiante. Les molécules à structure linéaire induisent ainsi un effet fluidifiant principalement par répulsion électrostatique et ont un mode d'action à court et moyen terme, ce qui est le cas pour le PNS.

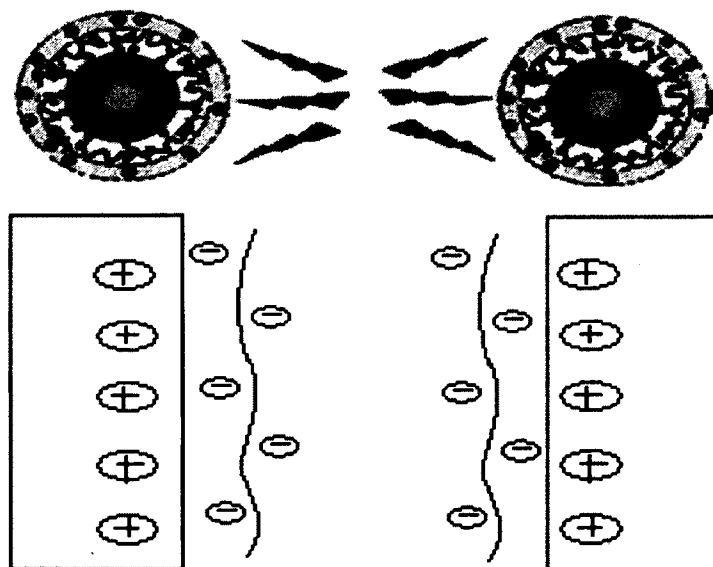


Figure 2.4 : Répulsion électrostatique.

b) Défloculation par répulsion stérique :

En plus de charge ionique, certaines molécules vont présenter une structure chimique très encombrée une fois à la surface des grains de ciment, ce qui aura pour effet d'empêcher le rapprochement des grains de ciment les uns vis-à-vis des autres du fait d'une « gêne » mutuelle.

On estime que la répulsion stérique est plus fréquente dans le cas de molécules de superplastifiants à structure de type « peigne » (figure 2.5). Les molécules s'absorbent à la surface des grains de ciment par le biais des charges présentées sur la chaîne principale de la macromolécule et les groupes « Branched-Chain » (chaîne secondaire) du côté de la chaîne. Ces dernières se prolongent dans l'eau environnant les grains de ciment. Il faut alors plus de temps pour que les hydrates du ciment recouvrent ces groupes. L'effet fluidifiant s'en trouve ainsi prolongé. Ainsi, les molécules à structure ramifiée induisent un effet fluidifiant principalement par répulsion stérique et elles ont un mode d'action à moyen et long terme. Ce type de SP constitue une nouvelle génération, car ils ont un pouvoir dispersant supérieur aux autres types de SP.

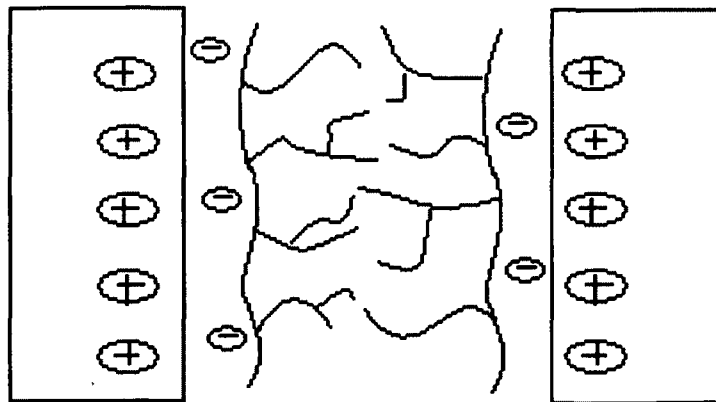


Figure 2.5 : Répulsion stérique

2.2.4 Effet sur la rhéologie

Suite aux différentes structures et aux différents modes d'action, les SP ont des influences sur la fluidité, les propriétés rhéologiques, la rétention dans le temps, et les propriétés mécaniques, etc. Les molécules de PNS peuvent être absorbées par le ciment. En effet, moins les molécules absorbées par le ciment, plus le mélange cimentaire est fluide (Kim et coll., 2000). Ainsi, la rhéologie et la rétention sont liées à l'absorption. La performance du mélange cimentaire dépend de la structure des groupes « Branched-Chain » pour le superplastifiant de type PC. La modification de la structure du PC entre la chaîne secondaire et la chaîne principale peut faire varier la rétention dans le temps et l'efficacité du PC. Le PC entraîne de meilleures fluidités et une plus grande rétention que le PNS. En fonction de la taille et de la structure du SP, certaines molécules peuvent induire un effet retardateur au niveau de la prise du béton. En effet, les molécules de SP peuvent avoir pour effet de « tapisser » la surface des grains de ciment, et bloquer l'arrivée de l'eau de gâchage, bloquant momentanément la formation d'hydrates.

2.3 Agent viscosité (VEA)

2.3.1 Fonction

Les agents de viscosité sont des produits généralement épaississants ou gélifiants qui augmentent la viscosité. Les agents de viscosité sont composés de molécules de longues chaînes de polymères qui vont alors stabiliser l'eau interstitielle en la rendant plus visqueuse, et collante, empêchant ainsi la tendance naturelle des particules lourdes de « tomber » au fond du béton (ségrégation).

2.3.2 Classement

Les fonctions secondaires de ces agents sont très différentes selon le type d'agent de viscosité employé. Ces agents de viscosité sont les polysaccharides et polymères solubles dans l'eau dont la classification proposée par Kawai et Okada (Kawai et Okada, 1989) est la suivante:

- Polymères naturels : polysaccharides de micro-organismes, comme l'amidon, les protéines de plantes, la gomme welan et les autres gommes naturelles.

- Polymère semi-synthétique : incluant les composés d'amidon et ses dérivés, contenant souvent de la cellulose-éther non ionique.
- Polymère synthétique : à base d'éthylène, comme par exemple le polyéthylène oxyde, le polyacrylamide, le polyacrylate etc.

2.3.3 Mode d'action

Selon Khayat (Khayat, 1998), il y a trois types de mode d'action.

- Adsorption : les molécules d'agent colloïdal adsorbent l'eau et prennent d'expansion.
- Association : les différentes particules développent des liaisons par site des forces de surface de Van der Waals et des ponts hydrogène.
- Chevauchement : à concentration élevée, les polymères se manifestent avec un chevauchement.

2.3.4 Effet sur la rhéologie

Les VEA permettent d'améliorer les caractéristiques rhéologiques des bétons (déformabilité, cheminement dans les coffrages, etc.), ainsi que la résistance au ressuage et à la ségrégation (principalement destinés aux BAP).

2.4 Agent entraîneur d'air (AEA)

2.4.1 Fonction

Les agents entraîneur d'air sont des adjuvants qui permettent d'entraîner volontairement la formation à l'intérieur des mortiers et des bétons, de petites bulles d'air de taille régulière, réparties de façon stable et homogène grâce aux turbulences générées par les pales du malaxeur et les particules fines et grossières. Ce réseau est composé de bulles dont le diamètre varie de 10 à 300 μm , uniformément réparties dans la masse du mélange. Ces microbulles vont jouer le rôle de vase d'expansion (chambres d'expansion) au niveau du front de gel et éviter l'éclatement du béton. On constate ce pendant une diminution des résistances mécaniques non compensées par la réduction de la quantité d'eau.

2.4.2 Classement

Il existe 2 types d'AEA, qui sont présentées ci-dessous :

- Le premier type d'agent entraîneur d'air ne réduit pas la tension de surface de l'eau, dont parmi eux, la résine de bois, les sulfonates, etc. Ce type d'AEA réagit avec l'hydroxyde de calcium soluble dans la pâte de ciment pour précipiter le sel de calcium insoluble. Ces derniers sont hydrophobes. L'ensemble de ces molécules hydrophobes entre les gains de ciment est la principale cause des bulles d'air d'entraînées (Friberg, 1976);
- Les synthétiques tensio-actifs (surfactants) : Ils sont composés de chaînes d'aliphatiques et/ou d'hydrocarbures aromatiques avec un groupe de SO_3 ou SO_4 ou OH , etc. Ces dernières sont attachées à la fin de la chaîne et sont solubles dans l'eau. Le comportement de solubilité dans l'eau est anormal.

2.4.3 Mode d'action

Il existe trois principaux mécanismes permettant d'expliquer l'action des agents entraîneur d'air (figure 2.6) (Gagné, R.).

- Réduction de la tension de surface (surfactants) : Les agents entraîneur d'air diminuent la tension superficielle de l'eau. Ils facilitent donc la formation de bulles en diminuant l'énergie requise pour créer des surfaces de contact air-eau.
- Formation d'un film insoluble (et hydrophobique) autour de vides d'air : Les agents entraîneur d'air sont des molécules tensio-actives les molécules présentant une partie hydrophyle (forte affinité avec l'eau) et une partie hydrophobe (aucune affinité avec l'eau).
- Stabilisation par adsorption sur les grains de ciment : Les agents entraîneur d'air migrent en effet à l'interface eau-air des bulles d'air créées lors du malaxage, puis, par interaction avec les particules de liant (les agents entraîneur d'air anionique sont hydrophobes, donc la charge négative est attirée par les grains de ciment chargés positivement), les bulles d'air vont adhérer aux grains de ciment, renforçant ainsi la stabilité du milieu (Du et Folliard, 2005).

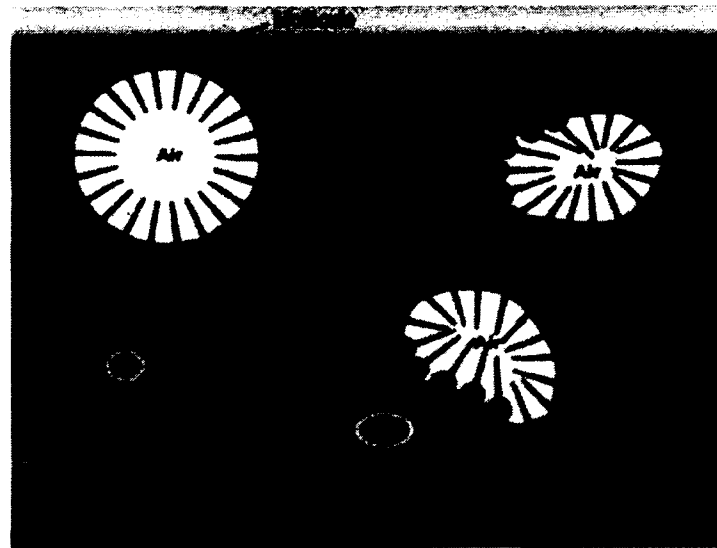


Figure 2.6 : Mécanismes d'action des agents entraîneurs d'air (Axim, 2008)

2.4.4 Effet sur la rhéologie

L'entraînement d'air améliore les propriétés rhéologiques du béton maigre (à teneur en liants faible) (Cordon, 1946). Pour le béton à haute performance et son MBE correspondant avec une faible maniabilité, l'incorporation d'AEA peut diminuer les propriétés rhéologiques (le seuil et la viscosité) et améliorer ses variations dans le temps (Golaszewski et coll., 2005). L'effet de l'AEA dépend du dosage utilisé dans le mélange cimentaire. L'ouvrabilité du mélange peut être augmentée à faible dosage en AEA, mais elle diminue lorsqu'elle atteint une limite (Ouyang et coll., 2008). L'effet d'AEA sur la rhéologie est complexe. Il peut être varié par la teneur en liant, le type et le dosage d'AEA et le dosage d'autre adjuvant combiné, etc.

2.5 Les combinaisons des adjuvants

La perte de fluidité, le retard de prise, le raidissement, la perturbation de la teneur en air entraîné, etc. tous sont les synonymes d'incompatibilité de mélange cimentaire.

2.5.1 Compatibilité entre le superplastifiant et le ciment

Une grande quantité de travail a été consacrée pour améliorer la compréhension des interactions Superplastifiant-Ciment (Jiang et coll., 1999) (Flatt et Houst, 2001) (Nakajima et

Yamada, 2004) (Maslehuddin et coll., 2006) et (Hallal et coll., 2010) Les facteurs de ciment qui peuvent influencer la performance SP ont été étudiés.

L'interaction entre le ciment et le SP est un phénomène de la surface et du physicochimique fort complexe. La morphologie de la surface des grains de ciment est très importante. L'efficacité des superplastifiants qui dispersent des grains de ciment et qui évitent ses floculations, est directement liée à l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules. En effet, leur adsorption est influencée par les caractéristiques physiques et chimiques des particules de ciments. Les molécules de PNS doivent être adsorbées sur les gains de ciment pour développer les forces de répulsion électronique et répulsion stérique. Il est constaté que le moins de superplastifiant adsorbé par le ciment, la combinaison est plus compatible, le mélange cimentaires est plus fluide. Il était confirmé par Kim (Kim et coll., 2000). L'absorption des polycarboxylates (PC) est différente que celle des PNS, car PC combinent les deux caractéristiques structurelles comme on a dit dans les paragraphes précédentes : une partie des charges négatif (carboxyliques l'équivalent) sur l'échine de la chaîne et une partie de non ioniques (polyéthylène glycol) liée par hydrogène avec les particules de silice du côté de la chaîne. Le taux d'adsorption de la polycarboxylate augmente principalement avec la diminution de carboxyliques l'équivalent. L'adsorption est déterminée par : le carboxylique équivalent et la longueur de la Branched-Chain.

Effet de la teneur en sulfates alcalins : La vitesse de dissolution des différents sulfates que l'on retrouve dans un ciment Portland est importante lorsqu'il s'agit de maintenir l'affaissement des bétons superplastifiés. La teneur en sulfates alcalins du clinker devient donc un facteur clé dans cette compétition entre les ions SO_4^{2-} et les terminaisons SO_3^- des polysulfonates lorsqu'il s'agit de neutraliser les sites actifs du C_3A (Aitcin et coll. 2001). Dans le ciment qui possède de C_2S élevé et de teneur alcaline en sulfates faible, le PC peut produire la pâte de ciment plus fluide que celui dans le ciment portland contenant forte teneur alcaline de sulfate. Pour le PNS, le pourcentage des ions sulfate adapté pour une grande fluidité de la pâte, est plus élevé que celui du PC, car le PNS adsorbé sur les C_3A dans les grains de ciment est en concurrence avec les ions SO_4^{2-} (Hanehara et Yamada, 1999). Si le ciment contient une très faible teneur en alcalins, comme par exemple le ciment blanc, il existe un problème d'incompatibilité avec le PNS. Ce phénomène a été confirmé par Kim (Kim et coll., 2000).

Afin de corriger l'incompatibilité entre le SP et ciment, il suffit de rajouter une quantité adéquate d'ions sulfate rapidement solubles dans le béton (Aitcin et coll., 2001). Par exemple, l'ajout d'une petite quantité de sulfates de sodium peut réduire la perte de fluidité. Figure 2.8 montre la diminution du pourcentage de SP adsorbée selon l'augmentation du dosage en sulfate de sodium.

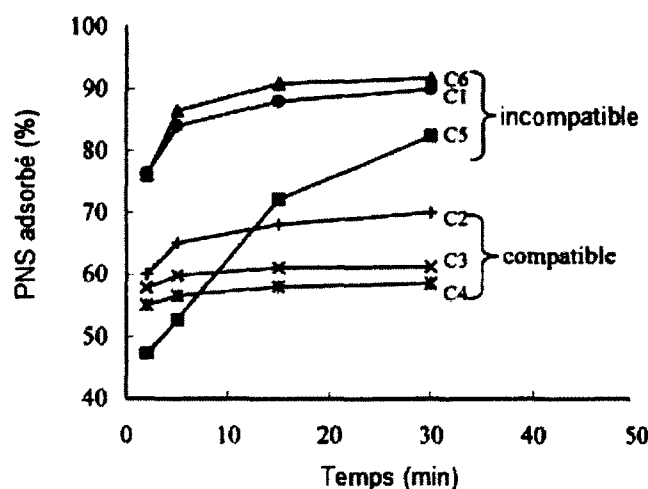


Figure 2.7 : Pourcentage de PNS adsorbé sur les grains de ciment en fonction de l'hydratation avec le temps à $E/C = 0,35$ (Kim et coll., 2000)

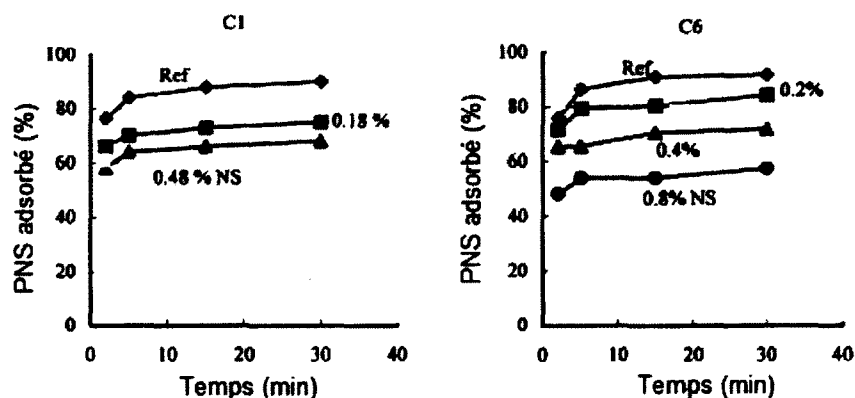


Figure 2.8 : Pourcentage de PNS adsorbé en fonction de l'hydratation avec le temps après l'addition de Na_2SO_4 (NS) (Kim et coll., 2000)

2.5.2 Compatibilité entre l'agent de viscosité et le ciment

L'agent de viscosité n'influence pas la capacité de la reprise de la viscosité, parce qu'il ne réagit pas avec les grains de ciment ni les ajouts cimentaires. C'est à dire que l'agent de viscosité n'influence que la viscosité de la phase fluide. Il augmente la capacité de rétention d'eau dans la suspension, ce qui provoque une légère modification de la viscosité de la pâte.

2.5.3 Compatibilité entre l'agent entraîneur d'air et le ciment

Les agents entraîneurs d'air guident les petites bulles d'air adhérant aux grains de ciment. Il existe également des interactions à l'interface solide-liquide-air. En général, plus le ciment est fin, plus le dosage en AEA doit être augmenté.

2.5.4 Compatibilité entre les adjuvants

a) SP/VEA

Le superplastifiant permettant une meilleure fluidité du mélange cimentaire, il diminue le seuil de cisaillement et peut diminuer ainsi la viscosité. L'agent de viscosité améliore la stabilité du mélange cimentaire, par contre, il peut-être augmenter la viscosité et le seuil de cisaillement. Pour avoir un béton à rhéologie adaptée ou un béton dont la mise en place est plus facile, une combinaison optimale en SP-VEA est nécessaire pour développer d'une synergie rendant les mélanges cimentaires fluides et stables. Par exemple, un béton autoplaçant (BAP) idéal est caractérisé pour l'équilibre entre la fluidité et la stabilité, ceci signifie que la combinaison de SP/VEA est compatible. Ainsi que dans une formulation de béton normale, on ajoute un type de SP pour diminuer le seuil, puis on utilise un autre VEA pour augmenter seulement la viscosité, sans changer le seuil. En réalité, la perte de fluidité engendrée par l'ajout d'un agent de viscosité peut être récupérée par l'ajout d'un superplastifiant sans affecter la stabilité des mélanges. En augmentant la quantité de VEA, l'effet du superplastifiant sur la diminution de la viscosité et du seuil de cisaillement est moins importante (figures 2.9 et 2.10). En conséquence, pour des teneurs élevées en agent de viscosité, l'ajout d'un dosage élevé en superplastifiant est nécessaire afin de garantir un niveau de fluidité donné (Yahia, 1997).

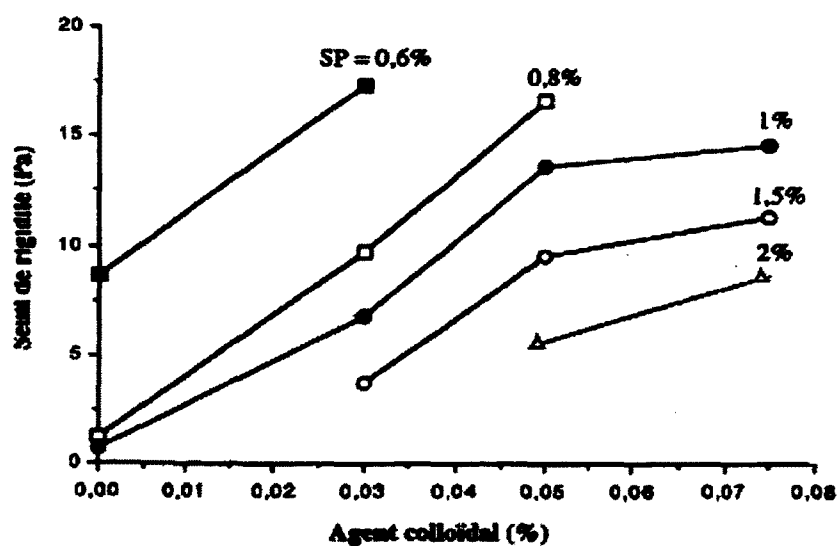


Figure 2.9 : Variation du seuil de cisaillement en fonction des différentes combinaisons de SP-VEA (Yahia, 1997)

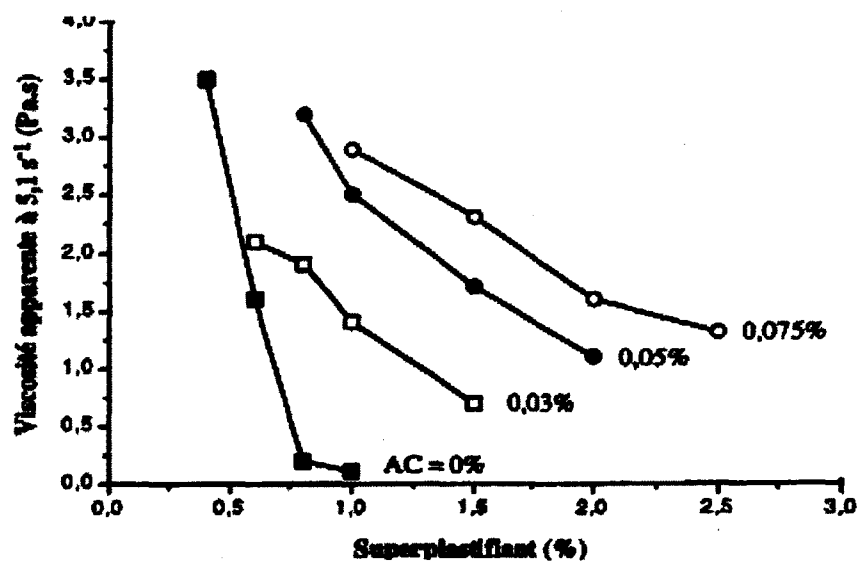


Figure 2.10 : Variation de la viscosité en fonction des différentes combinaisons de SP-VEA (Yahia, 1997)

Le VEA ne réagit pas avec les grains de ciment ni les ajouts cimentaires, mais il est en concurrence avec le SP pour les sites actifs sur les gains de ciment. Par conséquent, le VEA peut changer l'absorption du SP à la surface du ciment (Bédard et Mailvaganam, 2006), ce qui peut donner une incompatibilité quand on ajoute le SP et le VEA ensemble dans le mélange cimentaire. La figure 2.11 offre une comparaison entre les différentes combinaisons de SP-VEA. Pour une fluidité donnée, la combinaison idéale se trouve sur une ligne verticale. Plus la pente de la ligne est grande, moins il faut de SP pour maintenir un l'étalement identique, et donc le mélange incorporant cette combinaison est compatible et économique.

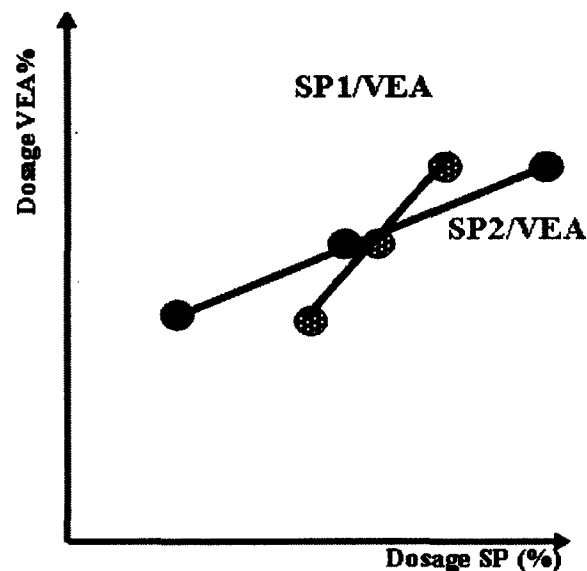


Figure 2.11 : Différentes compatibilités des combinaisons SP-VEA pour une fluidité donnée.

b) SP/AEA

Les superplastifiants peuvent accroître ou diminuer la teneur en air d'un mélange de béton en fonction de la formulation chimique de l'adjuvant et de l'affaissement du béton. La plupart des produits chimiques organiques augmentent une partie de l'air entraîné, parce qu'avec les concurrences, ils peuvent réduire l'adsorption des molécules d'AEA sur la surface solide. Par exemple, les superplastifiants en base de carboxylates tendent à accroître la teneur en l'air, tandis que ceux à base de mélamine peuvent soit réduire la teneur en air, soit avoir peu d'effet sur elle (Kosmatka et Kerkhoff, 2004). Il est difficile de trouver un couple d'adjuvants compatibles (entraîneur d'air et superplastifiant) quand la teneur en air n'est pas stable. Par exemple, la perte

d'air normale d'un béton superplastifié lors du malaxage et du transport est d'environ 2 à 4 %. Il est aussi nécessaire de travailler avec des matériaux humides pour ne pas piéger une partie des adjuvants mélangés à l'eau dans les granulats.

Il existe très peu de références sur les combinaisons parmi les adjuvants, surtout en ce qui concerne les bétons autoplaçants avec les ajouts cimentaires. En conséquence, il faut être très prudent avant de choisir des adjuvants pour un béton économique à caractère adapté; la compatibilité des adjuvants doit être examinée expérimentalement si les effets de ces combinaisons ne sont pas connus.

2.6 La rhéologie

2.6.1 Concepts de base de la rhéologie

a) Définition

Le terme rhéologie a été introduit en 1920 par le professeur Eugene Bingham. Il s'agit d'une science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux. L'objet de cette science est de définir les paramètres qui conditionnent le comportement rhéologique des matériaux.

- La contrainte de cisaillement τ : Force que l'on exerce par unité de surface du fluide (Unité Pa).
- Le seuil τ_0 : Plus petite contrainte pour permettre au liquide de s'écouler.
- Le gradient de vitesse γ : Evolution de la vitesse au sein du fluide (Unité s^{-1}).
- La viscosité μ : Coefficient qui lie la vitesse de déformation (par exemple, le taux de déformation par seconde) à la déformation (Unité Pa.s).

b) Comportement rhéologique

De nombreux modèles ou lois de comportement reliant la contrainte de cisaillement, τ , au gradient de vitesse, γ , etc. ont été développés afin de décrire les comportements rhéologiques suivants (figure 2.12) :

- Corps de Newton : $\tau = \mu\gamma$. Le fluide newtonien est le cas le plus simple. C'est le liquide dont la viscosité est constante. La viscosité ici est la viscosité absolue. Elle ne dépend pas du taux

de cisaillement. L'eau est un exemple simple de fluide où la viscosité est constante pour tous les taux de cisaillement.

- Corps de Bingham : $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$. Liquides dont la viscosité est constante après une limite ($\tau > \tau_0$). La viscosité dont il est question ici est la viscosité plastique. Il y a une relation linéaire entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement après avoir franchis. (ex : le béton).
- Le modèle Herschel-Bulkley : $\tau = \tau_0 + k \gamma^n$. Liquides permet de décrire le caractère rhéo-fluidifiant ou le caractère rhéo-épaississant du fluide.
- Corps de Rhéo-fluidifiant : $\tau = \tau_0 + k \gamma^n$ ($n < 1$). Liquides dont la viscosité diminue avec le taux de déformation. (Ex : le ketchup).
- Corps de Rhéo-épaississant : $\tau = \tau_0 + k \gamma^n$ ($n > 1$). Liquides dont la viscosité augmente avec le taux de déformation. (Ex : la pâte à pizza).

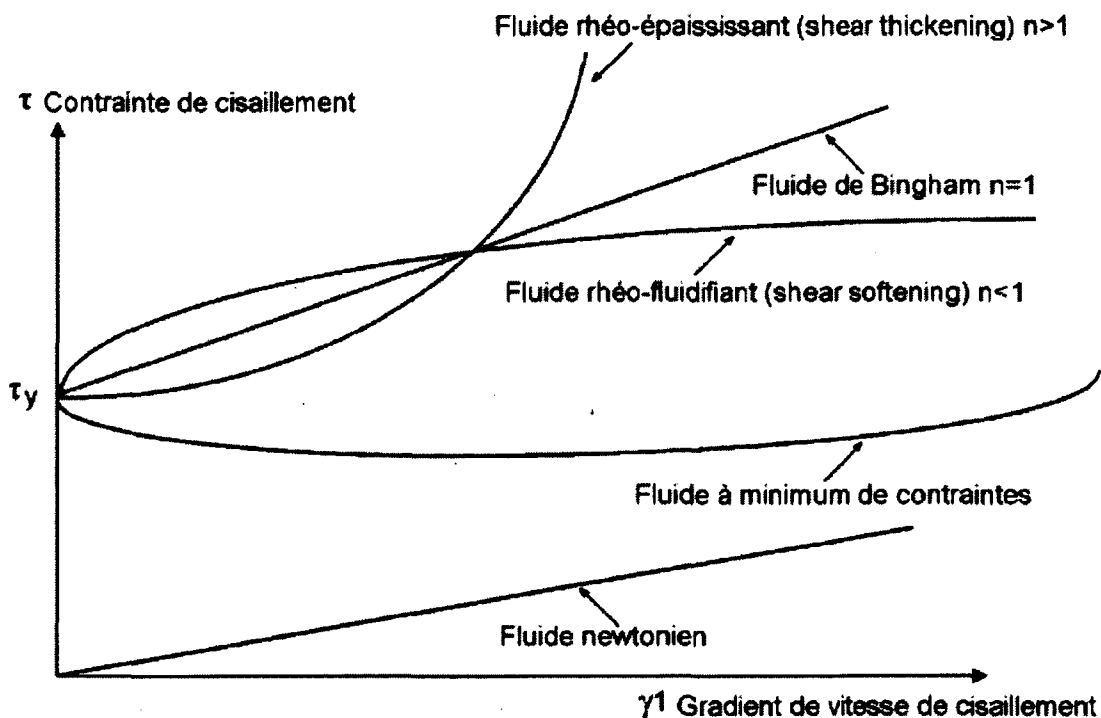


Figure 2.12 : Courbes d'écoulement en régime permanent de différents fluides

2.6.2 Rhéomètre

a) Rhéomètre normal

L'appareil utilisé pour mesurer les propriétés rhéologiques des fluides s'appelle le rhéomètre. Selon la géométrie de l'outil de mesure et la sollicitation imposée au fluide, il existe une grande variété de rhéomètres (Cousso, 1999) et (Courrazé et Grossiord, 2000) :

- Rhéomètre capillaire : Un instrument dont la partie principale est un tube dans lequel le matériau s'écoule. Il faut imposer à la suspension une différence de pression entre les deux extrémités du tube pour qu'elle s'écoule. Cette différence de pression permet de vaincre les frottements aux parois liés à la viscosité du matériau.
- Rhéomètre rotatif de type cône – plan : Un cône qui tourne sur sa pointe à l'instar d'une toupie avec une vitesse angulaire w_0 , est délicatement mis en contact sur un plan fixe. La substance étudiée est emprisonnée entre le plan et le cône de révolution. Il existe deux modes de fonctionnement, soit on impose un couple de rotation connu et l'on mesure la vitesse angulaire correspondante, soit la vitesse angulaire est imposée et l'on récupère la valeur du couple.
- Rhéomètres rotatifs de type plan – plan : Un appareil sur lequel deux disques coaxiaux sont en rotation relative. Il ne permet pas de contrecarrer les variations du gradient de vitesse au sein de l'échantillon en fonction de la distance par rapport à l'axe central.
- Rhéomètres à cylindres coaxiaux : Une famille de rhéomètres les plus utilisés. Ils sont fortement automatisés dans leur fonctionnement, avec leurs commandes et contrôles électroniques, leurs mesures automatisées, leurs acquisseurs des données. L'échantillon est placé entre deux cylindres coaxiaux. Il est important que l'entrefer soit faible.

b) Rhéomètre pour les matériaux cimentaires

Il y a différents types de rhéomètres qui peuvent être utilisés pour les matériaux cimentaires : le rhéomètre Two-Point (Tattersall et Bloomer, 1979), le rhéomètre IBB (modifié par Tattersall) (Tattersall et Banfill, 1983) (Beaupre et coll., 1994), le rhéomètre CEMAGREF-IMG (Coussot, 1993), le rhéomètre BTRHEOM (Hu et coll., 1996), le rhéomètre BML (Wallevik, 1990), etc. La plupart des matériaux cimentaires frais peuvent être décrits par la loi de BINGHAM et des divergences dans les valeurs de contraintes critiques et de viscosité peuvent

apparaître entre les différents rhéomètres. Ces différences observées sur une même loi de comportement pour différents rhéomètres peuvent s'expliquer par la configuration, et donc l'efficacité du rhéomètre à homogénéiser correctement les propriétés d'un béton frais en limitant la ségrégation naturelle du béton (Ferraris et Brower, 2003).

Des descriptions détaillées des rhéomètres IBB et BML, qui sont fréquemment utilisés à l'Université de Sherbrooke, sont données ci-dessous :

➤ **Rhéomètre IBB** : Ce rhéomètre est une version développée selon l'appareil existant (MKIII) (Tattersall et Banfill, 1983). Il été modifié au Canada par Beaupré (Beaupré et coll., 1994) pour étudier le comportement de béton à haute performance, avec une version portable. Le principe de fonctionnement est relativement simple. Un agitateur en forme de H tourne avec un mouvement planétaire dans un récipient contenant un échantillon de 25 litres de béton frais. Le contrôleur impose différentes vitesses de rotation à l'agitateur et pour six paliers en vitesse décroissante, le couple et la vitesse sont enregistrés (figure 2.13).

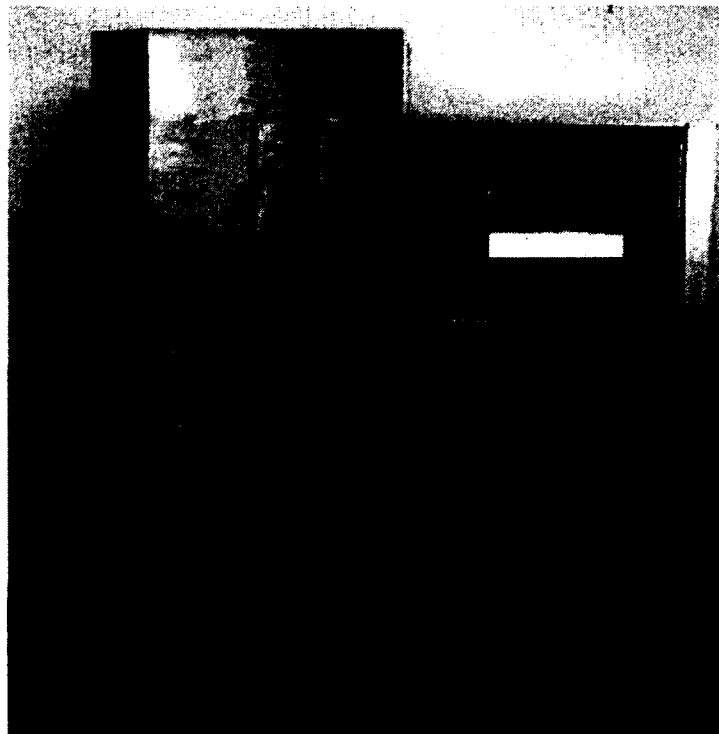


Figure 2.13 : Rhéomètre IBB

➤ **Rhéomètre BML** : Le viscosimètre BML été développé par Wallevik en 1987 à l'Institut norvégien de technologie, à Trondheim. Il existe 4 types de rhéomètre BML (figure 2.14) : ConTec BML 3 pour mortier et béton, viscomètre ConTec 4 pour pâte et mortier, viscomètre ConTec 5 pour mortier et béton, viscomètre ConTec 6 pour pâte et mortier. Ils s'agissent de rhéomètres coaxiaux à cylindres. Les paramètres de chaque système de mesure sont intégrés par le logiciel FreshWin. Figure 2.15 montre un résultat dans le temps, à savoir une torque en fonction de la vitesse. De plus, au lieu de donner les deux paramètres g et h , ils peuvent fournir les paramètres τ_0 et μ automatiquement.

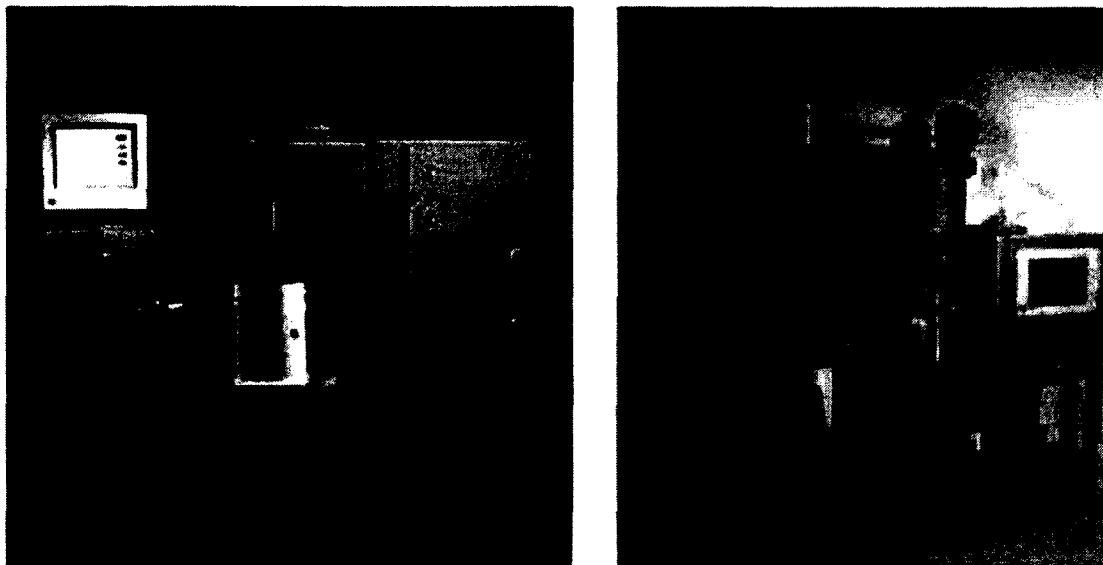


Figure 2.14 : Rhéomètre BML a) Version 3; b) Version 4, 5, 6

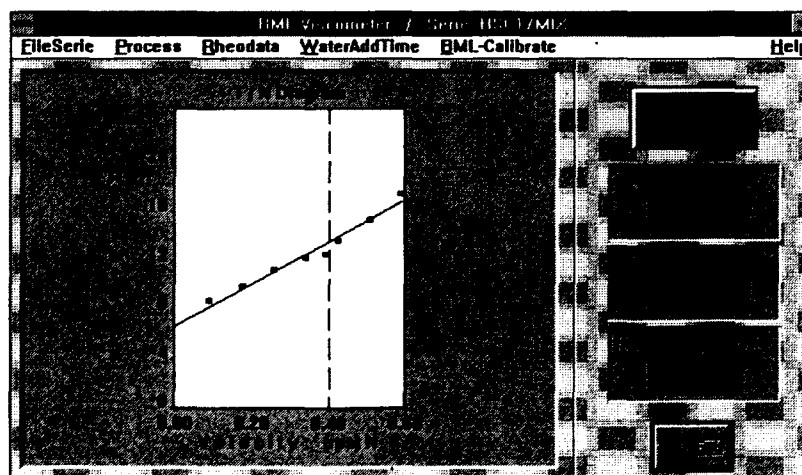


Figure 2.15 : Résultats avec le temps

2.6.3 Rhéologie des systèmes cimentaires

La description de l'écoulement d'un fluide utilise des concepts tels que la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement (Beauprè, 1994). La pâte de ciment, le mortier et le béton peuvent être décrits comme des suspensions viscoplastiques. Cela veut dire qu'en-dessous d'une valeur de contrainte critique (le seuil de cisaillement), la matière se comporte comme un solide, mais s'écoule comme un liquide visqueux quand cette contrainte est dépassée ($\tau > \tau_0$). Dans ce cas, la rhéologie des systèmes cimentaires est généralement mesurée en termes du seuil statique et dynamique, de la viscosité plastique et de la thixotropie. Le type le plus simple de ce comportement est le comportement linéaire du fluide de Bingham : $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$.

Il est important d'analyser les caractéristiques rhéologiques des matériaux cimentaires afin de satisfaire les différentes applications, par exemple : la réduction de la pression sur les coffrages, l'augmentation de la résistance à la ségrégation dynamique et statique; l'amélioration de la pompabilité, etc. D'énormes facteurs peuvent influencer la rhéologie des systèmes cimentaires, comme les adjuvants, les ajouts cimentaire, les fibres, les différentes compositions, etc. Pour cette raison, beaucoup de recherches dans ce domaine ont été effectuées à travers le monde (Koehler et coll., 2009) (Banfill, 2003), (Topcu et coll., 2009), (Kim et coll., 2010).

2.7 La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)

En raison des critères de performance élevés, la formulation d'un béton de haute performance à fluidité adaptée peut nécessiter l'utilisation de plusieurs adjuvants chimiques et ajout cimentaires. L'optimisation du dosage du béton nécessite plusieurs essais sur béton et beaucoup de temps. Afin de faire de choix parmi différents adjuvants pour satisfaire des besoins spécifiques, Schwartzentruber (Schwartzentruber et Catherine, 2000) a développé une méthode qui consiste à concevoir à partir d'un béton, un mortier de béton équivalent (MBE) dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton. Le méthode MBE permet de sélectionner rapidement parmi différents adjuvants celui qui répond le mieux aux exigences d'efficacité (rapport dosage/coût), de maintien rhéologique et de délai de décoffrage. Cette méthode ne remplace pas les études traditionnelles de composition du béton, mais elle améliore, par sa rapidité et sa simplicité, la formulation des bétons. Elle constitue une méthode fiable,

notamment pour la mise au point des bétons adjuvantés, et permet de détecter les éventuelles anomalies rhéologiques pouvant apparaître lors de la mise en œuvre du béton.

Le MBE a une composition similaire du béton qui le compose. Pour passer du béton au MBE, il faut remplacer les granulats du béton par du sable, parce que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent plutôt que leur volume. Des calculs complémentaires sont nécessaires afin de déterminer les surfaces spécifiques granulaires du sable, du gravillon et des passants du gravillon au tamis de 5 mm. La première partie de la transformation consiste à évaluer la surface développée par chacun des granulats dans le béton. Pour ce faire, il faut d'abord admettre les hypothèses suivantes :

- Les particules constituant les granulats sont des sphères parfaites ;
- Malgré leur porosité ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau ;
- A l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulats considéré.

Lorsque ce sont les surfaces de contact des constituants qui sont le plus important (car une partie de l'eau et de la pâte reste collée ou absorbée par les surfaces, et la pâte restante qui remplit les granulats confère au matériau sa fluidité). Une quantité supplémentaire de sable ayant la même surface totale que celle du granulats doit être ajoutée dans le MBE.

Il convient de déterminer la surface développée par le sable du béton qui sera utilisé dans le MBE. La démarche adoptée est rigoureusement identique à celle utilisée pour les gravillons, même dans le cas d'emploi de deux sables de masses volumiques distinctes.

Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux qui le seront sur le béton correspondant. Ainsi, aux essais d'étalement au cône d'Abrams du béton correspondront les essais d'étalement au mini-cône du MBE (figure 2.16). Chaque étalement du béton correspond un étalement constant pour son mélange MBE. Il existe une relation entre l'étalement du béton et celui du mortier (Erdem et coll., 2009) :

$$r = \frac{V_{SCC}}{A_{SCC} * (D_{max})_{SCC}} = \frac{V_{CEM}}{A_{CEM} * (D_{max})_{CEM}}$$

V_{SCC} : le volume de béton contenu dans le cône d'Abrams

A_{SCC} : l'aire de la surface sur laquelle s'étale le béton

$(D_{max})_{SCC}$: le diamètre du plus gros granulat pour le béton

V_{CEM} : le volume de mortier contenu dans le mini cône

A_{CEM} : l'aire de la surface sur laquelle s'étale le mortier

$(D_{max})_{CEM}$: le diamètre maximum du sable

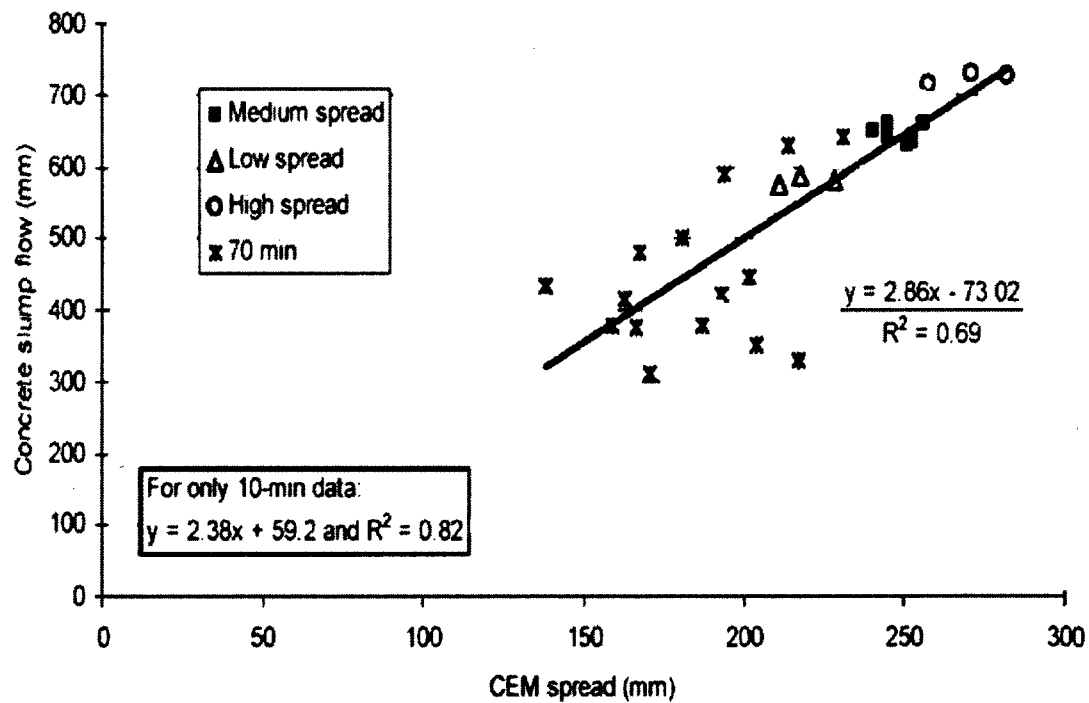


Figure 2.16 : Relation entre l'étalement du MBE et l'étalement du béton correspondant (Erdem et coll., 2009)

CHAPITRE 3

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Caractéristiques des matériaux

3.1.1 Ciment

Le ciment est fourni par la compagnie Ciment St-Laurent. Les propriétés chimiques et physiques du ciment sont présentées respectivement dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1 : Analyse chimique et composition du ciment GU

Identification	% en masse
SiO ₂	20,6
Al ₂ O ₃	4,5
Fe ₂ O ₃	2,7
CaO	62,7
MgO	2,0
SO ₃	3,6
C ₃ S	54
C ₂ S	18
C ₃ A	7
C ₄ AF	8

Tableau 3.2 : Propriétés physiques du ciment GU

Finesse Blaine	392 m ₂ /kg
Expansion à l'autoclave	0,004%
Expansion dans l'eau	0,009%
Temps de prise initial	180 min
Temps de prise final	240 min
Teneur en air	7,4 %

Le ciment LH est utilisé lorsque la chaleur de l'hydratation doit être minimisée. Son taux de durcissement est plus lent que les autres types de ciment. Il est souvent utilisé dans les structures massives en béton, comme les barrages, où l'influence de température due à la chaleur d'hydratation pour durcissement doit être minimisée. Les caractéristiques chimiques et physiques du ciment LH sont présentées dans les tableaux 3.3 et 3.4.

Tableau 3.3 : Analyse chimique et composition du ciment LH

Identification	% en masse
SiO ₂	23,7
Al ₂ O ₃	3,3
Fe ₂ O ₃	4,7
CaO	62,6
MgO	1,7
SO ₃	2,3
C ₃ S	39
C ₂ S	38
C ₃ A	0,9
C ₄ AF	14

Tableau 3.4 : Propriétés physiques du ciment LH

Finesse Blaine	335 m ² /kg
Expansion à l'autoclave	0,008%
Expansion dans l'eau	0,042%
Temps de prise initial	285 min
Temps de prise final	395 min
Teneur en air	7,2%

3.1.2 Ajouts cimentaires

Les cendres volantes (FA) classe F ayant une densité de 2,36 sont utilisées dans certains bétons. L'analyse chimique de ce type de FA de classe F est présentée dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5: Analyse chimique des cendres volantes de classe F

Identification	% en masse
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$(53,89 + 20,97 + 10,15) = 85,01$
SO_3	1,36
CaO	2,93
Teneur en humidité	0,05
Perte au feu	1,72
Na_2O /Alcalin total	0,64/4,31

3.1.3 Granulats

Deux types des granulats ont été utilisés dans cette étude. Le premier type contient uniquement des granulats de 5-14 mm ayant une densité 2,71 et un coefficient d'absorption de 0,47%. Le deuxième type de granulats est une combinaison de trois granulats de 5-10 mm, 10-20 mm et 20-40 mm, en proportion massique de 15%, 40% et 45% respectivement, avec des densités de 2,74, 2,73 et 2,73 et des coefficients d'absorption de 0,52%, 0,34% et 0,3% respectivement. La granulométrie des granulats est présentée dans le tableau 3.6. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et les figures 3.1-3.4.

Tableau 3.6: Distribution granulométrique des granulats

tamis (mm)	Tamisât (%)			
	G5-10	G5-14	G10-20	G20-40
1,25	1,6	1	0,3	1
2,5	1,7	1	0,3	1
5	40,2	9	0,3	2
10	82,2	58	1	3
14	100	93	9,3	4
20	100	100	89,6	10
28	100	100	100	52
40	100	100	100	91
100	100	100	100	100

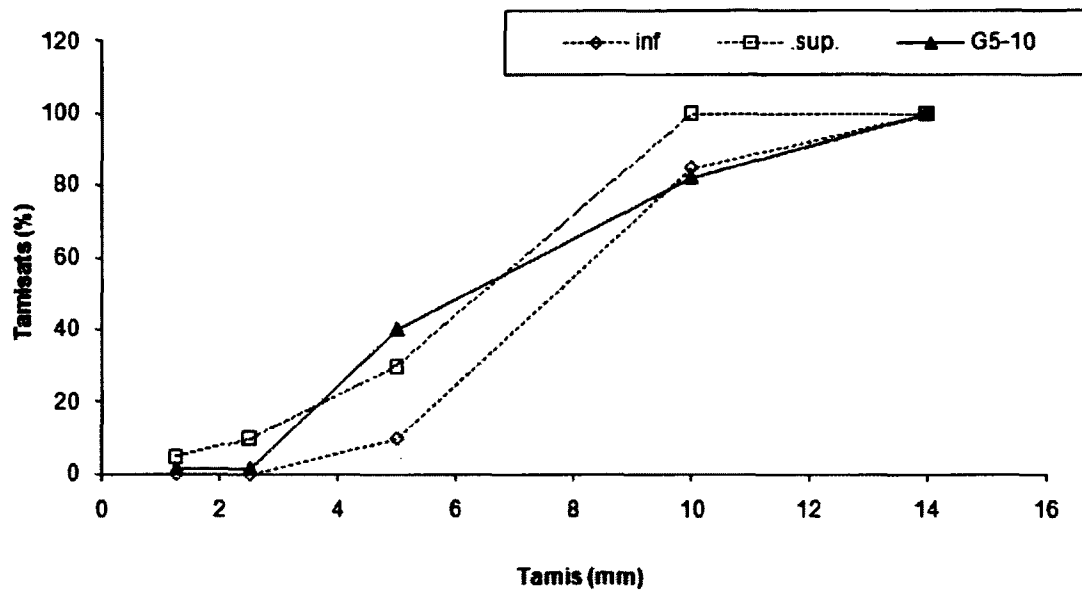


Figure 3.1 : Granulométrie du granulat 5-10 mm (G5-10)

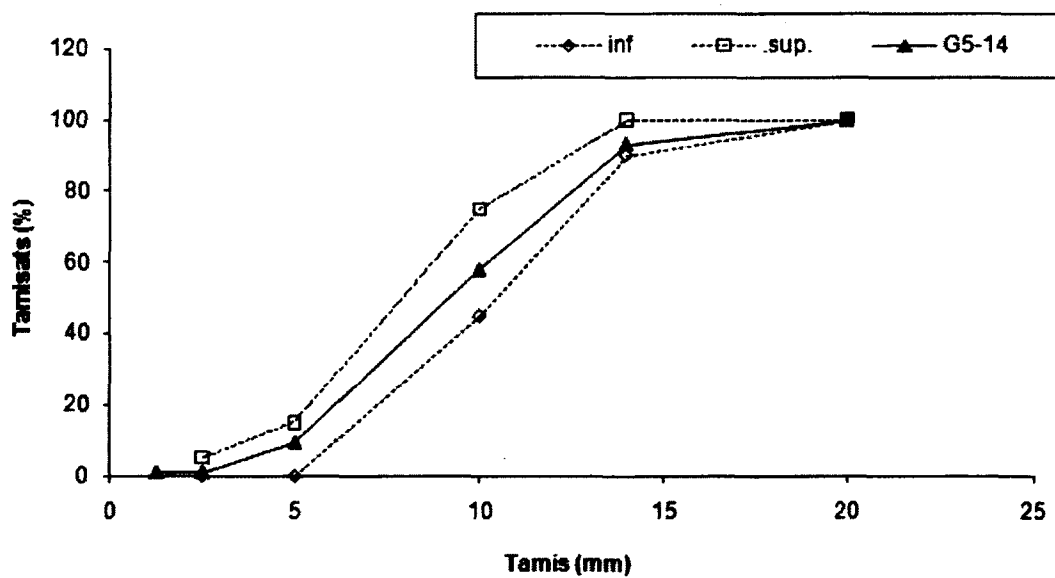


Figure 3.2 : Granulométrie du granulat 5-14 mm (G5-14)

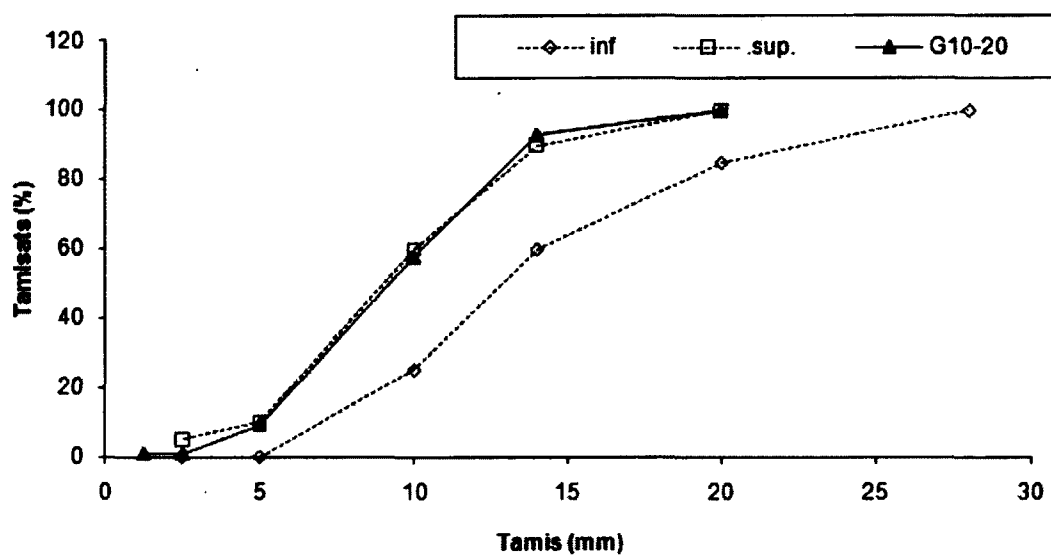


Figure 3.3 : Granulométrie du granulat 10-20 mm (G10-20)

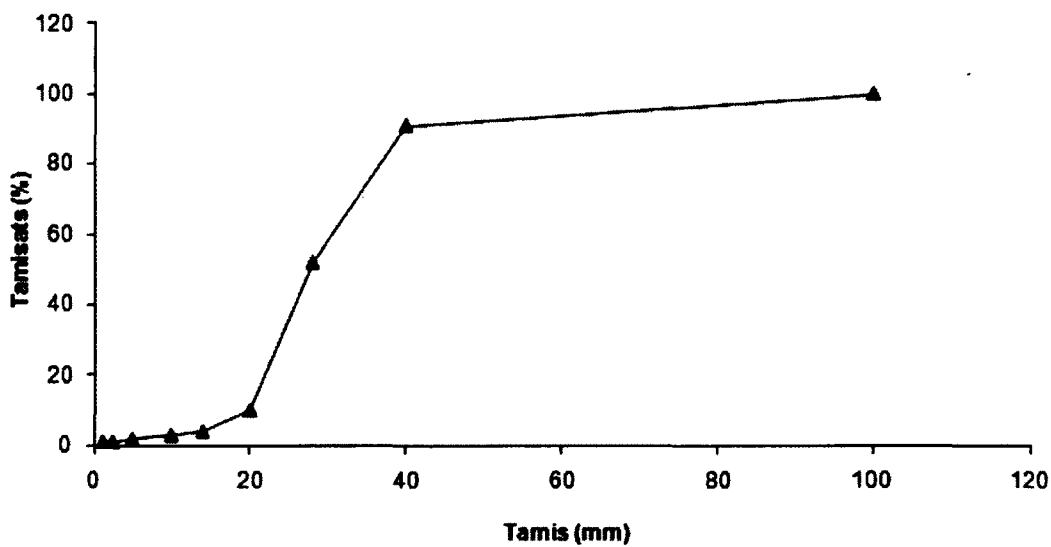


Figure 3.4 : Granulométrie du granulat 20-40 mm (G20-40)

3.1.4 Sable

Le sable utilisé est un sable naturel, ayant une densité de 2,63 et un coefficient d'absorption de 1.29%. La granulométrie du sable est présentée dans le tableau 3.7 et la figure 3.5

Tableau 3.7: Distribution granulométrique du sable

Tamis (mm)	Tamisât (%)
0,080	3,13
0,160	9,61
0,315	30,56
0,630	58,36
1,250	72,16
2,500	84,52
5,000	100,00

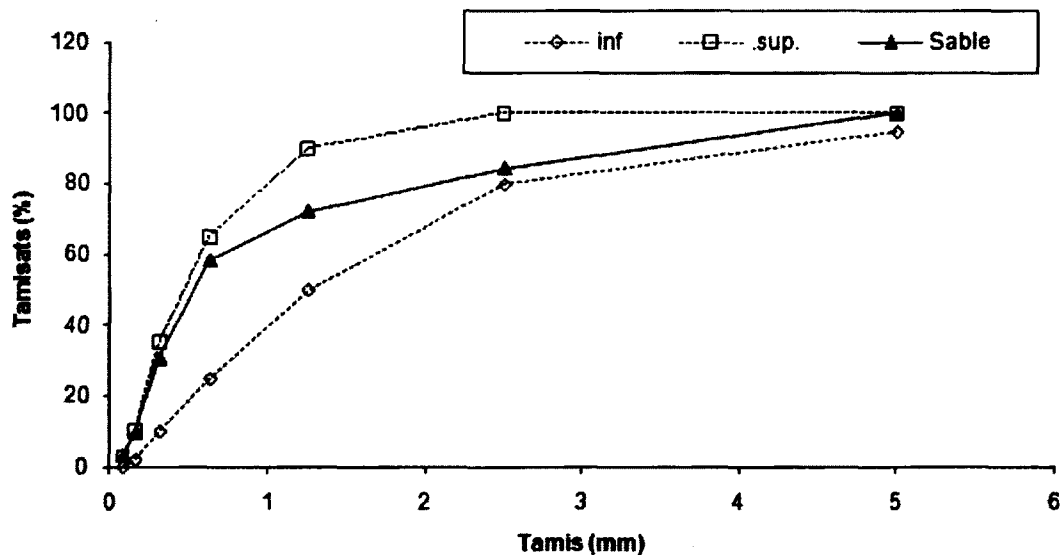


Figure 3.5 : Granulométrie du sable

3.1.5 Adjuvants

Au total douze types de superplastifiant (SP) ont été utilisés dans cette étude. De ceci, on retrouve huit types polycarboxylates (PC), deux types mi-rangs réducteurs d'eau, et deux types polynaphtalenes (PNS). D'ailleurs, trois types d'agent viscosité (VEA), deux types d'agent entraîné air (AEA) et un retardateur (Ret) ont ainsi analysé dans cette étude. Les densités et les extraits secs sont mesurés dans le laboratoire de chimie, montrés dans le tableau 3.8. Ils sont fournis par les partenaires de la chaire. En fait, les types, les dosages et les combinaisons d'adjuvant utilisés dans les divers de béton sont décidés par les partenaires aussi.

Tableau 3.8: Densités et extraits secs d'adjuvant

SP	Densité (g/ml)	Extrait sec (%*)
PC1	1,08	39,12
PC2	1,07	30,18
PC3	1,08	39,51
PC4	1,08	40,41
PC5	1,08	39,47
PC6	1,08	39,47
PC7	1,09	41,82
PC8	1,07	33,55
PNS1	1,20	40,98
PNS2	1,22	41,34
MR1	1,04	20,78
MR2	1,05	22,98
VEA	Densité (g/ml)	Extrait sec (%*)
VEA14	1,23	44,2
VEA23	1,21	42,5
VEA35	1,02	1,3
AEA	Les valeurs expérimentales	
	Densité (g/ml)	Extrait sec (%*)
AEA14	1	8,3
AEA23	1,01	10,12

* : poudre active en % de masse du liant

3.2 Formulation de chaque type de béton et de MBE

3.2.1 Types de béton et de MBE

Il y a cinq types de bétons à haute performance (BHP) à rhéologie adaptée dans la chaire industrielle de l'Université de Sherbrooke : Le béton autoplaçant pour la construction des bâtiments (BAP-B), le béton autoplaçant pour la préfabrication (BAP-P), le béton semi-fluide autoplaçant (BSAP), le béton de masse avec une fluidité identique au BSAP (BSAP-BM) et le béton de masse fluide (BMF). Ces compositions du béton sont présentées par le tableau 3.9. Avec la méthode du mortier de béton équivalent, cinq types de MBE correspondants peuvent être présentés suivant : le mortier béton équivalent du béton autoplaçant en bâtiment (MBE-BAP-B), le mortier béton équivalent du Béton autoplaçant en préfabrication (MBE-BAP-P), le mortier béton équivalent du béton Semi-fluide autoplaçant (MBE-BSAP), le mortier béton équivalent du béton de masse avec une fluidité identique au BSAP (MBE-BSAP-BM) et le mortier béton équivalent du béton de masse fluide (MBE-BMF). Les compositions des différents bétons et MBE sont présentés par le tableau 3.10.

Tableau 3.9: Compositions des bétons

	BAP-B	BAP-P	BSAP	BSAP-BM	BMF
E/L	0.45	0.41	0.41	0.50	0.50
Teneur en liant, kg/m ³	425	460	400	280	280
Liant	GU+25 % Cendres volantes classe F	GU+25 % Cendres volantes classe F	GU+25 % Cendres volantes classe F	LH	LH
Rapport S/A, en volume	0.45	0.50	0.50	0.38	0.38
Diamètre granulat	14	14	14	10,20 et 40	10,20 et 40
Étalement, mm	680 ± 40	650 ± 20	550 ± 20	500 ± 50	150 ± 25

Tableau 3.10: Compositions des MBE

	MBE-BAP-B	MBE-BAP-P	MBE-BSAP	MBE-BSAP-BM	MBE-BMF
E/L	0.45	0.41	0.41	0.50	0.50
Teneur en liant, kg/m ³	650	670	600	530	530
Liant	GU+25 % Cendres volantes classe F	GU+25 % Cendres volantes classe F	GU+25 % Cendres volantes classe F	LH	LH
Sable kg/m ³	1275	1310	1450	1510	1510
Etalement, mm	260 ± 10	250 ± 20	210 ± 10	210 ± 10	180 ± 10

3.2.2 Plan expérimental

Cette étude comporte les quatre phases suivantes :

- 1^{ère} phase : Évaluation de la performance des différents superplastifiants (SP) sur le MBE.
- 2^{ème} phase : Étude de compatibilité entre des combinaisons de superplastifiants et agents viscosité (SP/VEA) sur le MBE.
- 3^{ème} phase : Étude de compatibilité entre des combinaisons de superplastifiants et agents entraîneurs d'air (SP/AEA) sur le MBE.
- 4^{ème} phase : validation des résultats sur le béton.

Phase I : SP

Cette phase étudie uniquement l'effet des différents dosages en SP sur trois types de MBE (MBE-BAP-B, MBE-BAP-P et MBE-BSAP). Les types de SP et les dosages recommandés dans ces trois types du MBE sont montés dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11: Types de SP et dosages recommandés dans le MBE

MBE-BAP-B		MBE-BAP-P		MBE-BSAP	
Adjuvant	Dosage*	Adjuvant	Dosage*	Adjuvant	Dosage*
PC1	0,06 %-0,12 %	PC1	0,11 %-0,16 %	PC1	0,08 %-0,20 %
PC2	0,07 %-0,15 %	PC2	0,14 %-0,22 %		
PC3	0,10 %-0,16 %	PC3	0,10 %-0,21 %		
PC4	0,09 %-0,14 %	PC4	0,14 %-0,18 %		
PC5	0,16 %-0,32 %			PC5	0,14 %-0,32 %
		PC6	0,10 %-0,17 %		
		PC7	0,12 %-0,20 %		
PNS1	0,25 %-0,40 %			MR1	0,14 %-0,16 %
				PNS1	0,30 %-0,50 %
5 PC et 1PNS		6 PC		3 PC et 1 PNS	

* La masse d'extrait sec d'adjuvant par rapport de la masse de liant.

Phase II : SP/VEA

Cette phase étudie l'effet de la combinaison de SP/VEA et des différents dosages en adjuvant sur 3 types de MBE (MBE-BAP-B, MBE-BAP-P et MBE-BSAP-BM). Les combinaisons de SP/VEA et les dosages recommandés dans les deux premiers types du MBE sont montés dans les tableaux 3.12 et 3.13. Dans chaque type de combinaison, quatre dosages en VEA (sans, faible, moyen et élevé) qui sont basés sur les spécifications du producteur de VEA sont étudiés avec l'incorporation du SP. Pour le MBE-BSAP-BM, les sept combinaisons de SP/VEA choisies par les partenaires, sont présentés dans le tableau 3.14. Mais les dosages d'adjuvant doivent être ajustés dans cette étude selon la fluidité et la stabilité de MBE-BSAP-BM.

Tableau 3.12: Combinaisons de SP/VEA et dosages recommandés dans le MBE-BAP-B

6 combinaisons	Dosage en VEA	Dosage en VEA (masse d'extrait sec/liant)	Dosage en VEA (ml/100 kg de liant)
PC1+VEA14	sans	0 %	0
	faible	0,020 %	40
	moyen	0,080 %	150
	élevé	0,140 %	260
PC4+VEA14	sans	0 %	0
	faible	0,020 %	40
	moyen	0,080 %	150
	élevé	0,140 %	260
PC2+VEA23	sans	0 %	0
	faible	0,020 %	40
	moyen	0,080 %	160
	élevé	0,140 %	270
PC3+VEA23	sans	0 %	0
	faible	0,020 %	40
	moyen	0,052 %	100
	élevé	0,080 %	160
PC8+VEA35	sans	0 %	0
	faible	0,002 %	150
	moyen	0,007 %	530
	élevé	0,013 %	980
PNS1+VEA23	sans	0 %	0
	faible	0,120 %	235
	moyen	0,190 %	370
	élevé	0,290 %	565

Tableau 3.13: Combinaisons de SP/VEA et dosages recommandés dans le MBE-BAP-P

5 combinaisons	Dosage en VEA	Dosage en VEA (masse d'extrait sec/liant)	Dosage en VEA (ml/100 kg de liant)
PC1+VEA14	sans	0 %	0
	faible	0,0200 %	40
	moyen	0,0380 %	70
	élevé	0,0550 %	100
PC4+VEA14	sans	0 %	0
	faible	0,0200 %	40
	moyen	0,0380 %	70
	élevé	0,0550 %	100
PC2+VEA23	sans	0 %	0
	faible	0,0213 %	40
	moyen	0,0380 %	75
	élevé	0,0554 %	110
PC3+VEA23	sans	0 %	0
	faible	0,0213 %	40
	moyen	0,0380 %	75
	élevé	0,0554 %	110
PC7+VEA23	sans	0 %	0
	faible	0,0213 %	40
	moyen	0,0384 %	75
	élevé	0,0554 %	110

Tableau 3.14: Combinaisons de SP/VEA dans le MBE-BSAP-BM

7 combinaisons	SP	VEA
Ref	PC6	DG
PC1+VEA14	PC1	VEA14
PC5+DG	PC5	DG
MR1+VEA23	MR1	VEA23
MR2+VEA14	MR2	VEA14
PNS1+VEA23	PNS1	VEA23
PNS2+VEA23	PNS2	VEA23

Phase III : SP/AEA

Cette phase étudie l'effet de la combinaison de SP/AEA et des différents dosages en AEA sur 2 types de MBE (MBE-BSAP et MBE-BMF). Les combinaisons de SP/AEA et les dosages recommandés dans ces 2 types du MBE sont montées dans les tableaux 3.15 et 3.16.

Tableau 3.15: combinaisons de SP/AEA et les dosages recommandés dans le MBE-BSAP

3 combinaisons	Dosage SP (masse d'extra sec/liant)	Dosage SP (ml/100 kg de liant)	Teneur en AEA	Dosage en AEA (masse d'extra sec/liant)	Dosage en AEA (ml/100 kg de liant)
PC1+AEA14	0,157%	370	sans	0 %	0
			faible	0,0017 %	20
			moyen	0,0035 %	35
			élevé	0,0080 %	100
MR1+AEA23	0,146%	675	sans	0 %	0
			faible	0,0017 %	20
			moyen	0,0035 %	35
			élevé	0,0100 %	100
PNS1+AEA23	0,461%	935	sans	0 %	0
			faible	0,0035 %	35
			moyen	0,0100 %	100
			élevé	0,0202 %	200

Tableau 3.16: Combinaisons de SP/AEA et les dosages recommandés dans le MBE-BMF

3 combinaisons	Dosage SP (masse d'extra sec/liant)	Dosage SP (ml/100 kg de liant)	Teneur en AEA	Dosage en AEA (masse d'extra sec/liant)	Dosage en AEA (ml/100 kg de liant)
MR2+AEA14	0,140%	330	sans	0 %	0
			faible	0,0011 %	20
			moyen	0,0021 %	35
			élevé	N/A	N/A
MR1+AEA23	0,096%	440	sans	0 %	0
			faible	0,0015 %	15
			moyen	0,0038 %	35
			élevé	0,0064 %	60
PNS2+AEA23	0,538%	1090	sans	0 %	0
			faible	0,0039 %	40
			moyen	0,0064 %	60
			élevé	0,0112 %	110

Phase IV : Validation du béton

Cette phase fait la validation du béton selon les résultats des premières trois phases de MBE. La validation d'effet SP/VEA est faite dans le BAP-B. Trois combinaisons de SP/VEA sont choisies parmi six combinaisons dans le MBE-BAP-B, et les mêmes dosages en VEA dans le MBE sont utilisés dans le béton (tableau 3.17). Le dosage en SP est ajusté pour obtenir un étalement de 680 ± 40 mm. L'effet combiné de tous les types d'adjuvant (SP/VEA/AEA/Ret) est validé dans le BSAP-BM. Les cinq combinaisons et les dosages en adjuvant sont présentés dans le tableau 3.18.

Tableau 3.17: Combinaisons de SP/VEA et dosages utilisés dans le BAP-B

3 combinaisons	Dosage en VEA	Dosage en VEA (masse d'extra sec/liant)	Dosage en VEA (ml/100kg de liant)
PC1+VEA14	sans	0 %	0
	moyen	0,05 %	100
	élevé	0,14 %	260
PC2+VEA23	sans	0 %	0
	moyen	0,1	200
	élevé	0,140 %	273
PNS1+VEA3	sans	0 %	0
	élevé	0,290 %	566

Tableau 3.18: Combinaisons d'adjuvant et les dosages utilisés dans le BSAP

5 combinaisons	Dosage en SP (ml/100 kg de liant)	Dosage en VEA (ml/100 kg de liant)	Dosage en AEA (ml/100 kg de liant)	Dosage en Retardateur (masse d'extra sec/liant)
MR2+VEA14(1)	870	90	5	-
MR2+VEA14(2)	1200	240	30	-
PNS2+VEA23+Ret(0)	1400	170	75	-
PNS2+VEA23+Ret(1)	1400	170	75	0,025 %
PNS2+VEA23+Ret(2)	1400	170	75	0,05 %

3.3 Méthodologie

3.3.1 Séquence de malaxage

Pour obtenir les résultats comparables, la procédure de malaxage du MBE et du béton est la suivante :

- Introduire tout le sable et la plus grande partie d'eau dans le malaxeur pendant 30 s à la vitesse minimale.
- Introduire le ciment et les cendres volantes classe F, démarrer le chronomètre et malaxer à la vitesse minimale.
- Introduire les SP et une partie d'eau dans le malaxeur à 1 min.
- Introduire les autres adjuvants et la dernière partie d'eau dans le malaxeur de 2 min à 4 min.
- Arrêter le malaxage à 4min et laisser reposer le mortier/béton pendant 3 min.
- Recommencer le malaxage à 7 min à la vitesse minimale.
- Finir le malaxage à 9 min.

3.3.2 Test pour le MBE

a) Séquence d'essais

De nombreux essais à l'état frais sont effectués de 10 min à 60 min après le contact eau-ciment, avec répétitions des essais à 10, 30 et 60 min. En conséquence, chaque fois après avoir remalaxé 1 min, l'ordre d'essai suivant doit être respecté:

- Température (10, 30 et 60 min)
- Etalement (10, 30 et 60 min)
- Temps d'écoulement (10 et 60 min)
- Rhéomètre (10, 30 et 60 min)
- Teneur en air (10 et 60 min)
- Ressuage forcé (10 min)
- Calorimètre (30 min)

b) Protocole d'essai

Afin d'analyser la maniabilité, la stabilité, les propriétés rhéologiques, la rétention dans le temps, les propriétés mécaniques à l'état frais et à l'état durci, les nombreux essais sont faits dans le temps (tableau 3.19).

Tableau 3.19 : Essais pour le MBE

Propriétés	Mesures	Appareils	Temps après le contact eau-ciment	Normes
Ouvrabilité	Mini-étalement	Mini-cône	10, 30, 60 min	ASTM C1437
Ouvrabilité	Temps d'écoulement	Mini V-funnel	10, 30, 60 min	
	Indice de ressuage forcé	Ressuage forcé (100psi)	10 min	
Stabilité	Indice de ségrégation	Colonne de conductivité*	10 min à 5 heures	
	Ressuage statique			
Rhéologie	Seuil Viscosité plastique	Rhéo ConTec	10, 30, 60 min	
Teneur en air	Air total	Bol en 400ml	10 et 60 min	ASTM C185
Temps de prise	Dégagement de la chaleur	Calorimètre adiabatique	24 ou 48 heures	
Propriété mécanique	Resistance à la compression	Presse	1, 7, 28 et 91 jours	ASTM C109 ASTM C 39

* : colonne de conductivité est développée par l'Université de Sherbrooke

3.3.3 Test pour le béton

a) Séquence d'essais

Afin d'avoir les résultats comparables entre le MBE et le béton, les mêmes propriétés sont étudiées dans la validation du béton. En conséquence, la séquence d'essais similaire dans le béton est respectée comme suit :

- Température (10, 30 et 60 min)
- L'étalement (10, 30 et 60 min)

- Colonne de ségrégation (10min)
- Rhéomètre (10, 30 et 60min)
- Teneur en air (10 et 60 min)
- Calorimètre (30 min)

b) Protocole d'essai

La description du protocole d'essai peut séparer à deux parties selon le BAP-B et le BSAP. Parce que les différentes tailles de granulats provoquent les différents tests utilisés dans ces 2 types de béton.

En utilisant le granulat 5-14 mm (BAP-B), le rhéomètre ConTec peut être utilisé afin de tester les propriétés rhéologiques, et le cylindre d'échantillon est 100*200 mm. Le protocole d'essai est présenté dans le tableau 3.20.

En utilisant la combinaison de granulate jusqu'à 40 mm (BSAP-BM), le rhéomètre ConTec ne peut plus être utilisé. Il y a moins d'essai à l'état frais, mais plus d'essais intéressants à l'état durci. Les moules d'échantillon sont plus grands aussi. Les essais à l'état frais et à l'état durci sont montrés respectivement dans les tableaux 3.21 et 3.22

Tableau 3.20: Essais pour le BAP-B

Propriétés	Mesures	Appareils	Temps après le contact eau-ciment	Normes
Ouvrabilité	Étalement/Affaissement	Cône d'Abrams	10, 30, 60 min	ASTM C143
Ouvrabilité	Capacité à travers les armatures	J-Ring	10, 30, 60 min	
Stabilité	indice de ségrégation	Colonne de ségrégation	10 min	
Rhéologie	Seuil Viscosité plastique	Rhéo ConTec	10, 30, 60 min	
Teneur en air	Air total	Air-mètre	10 et 60 min	ASTM C231
Propriété mécanique	Resistance à la compression	Presse	1, 28 et 91 jours	ASTM C 39

Tableau 3.21: Essais pour le BSAP-BM à l'état frais

Propriétés	Mesures	Appareils	Temps après le contact eau-ciment	Normes
Ouvrabilité	Étalement/Affaissement	Cône d'abrams	10, 30, 60 min	ASTM C143
Stabilité	% de ségrégation	Colonne de ségrégation	15 min à 30 min	
	% de tassement	Colonne de tassement	60 min à 48 heures	
Teneur en air	Air total	Air-mètre	10 et 60 min	ASTM C231
Temps de prise	dégagement de la chaleur	Calorimètre semi-adiabatique	40 min à 48 heures	

Tableau 3.22: Essais pour le BSAP-BM à l'état durci

Mesures	Moule (mm ³)	Remplissage	Murissement	Temps après le contact eau-ciment	Normes
Resistance à la compression	150×300	2 couches 50coups	Dans la salle avec 100% humidité	1, 28 et 91 jours	ASTM C 39
Module E	150×300	2 couches 50coups	Dans la salle avec 100% humidité	28 jours	ASTM C597-97
Distribution d'air	150×300	2 couches 50coups	Dans la salle avec 100% humidité	28 jours	ASTM C457-98
Perméabilité ions chlorure	150×300	2 couches 50coups	Dans la salle avec 100% humidité	28 et 91 jours	
Résistance en gel-dégel	75×75×350	2 couches 76coups	Dans l'eau	14 jours	ASTM C666-97
Écaillage	250×280×75	1 couche 51 coups	Dans la salle avec 100% humidité	28 jours	BNQ 2621-900
Retrait séchage	100×100×400	2 couches 58 coups	Dans l'eau	7 jours	ASTM C157

CHAPITRE 4

Effet des superplastifiants sur les propriétés des mortiers de béton équivalents

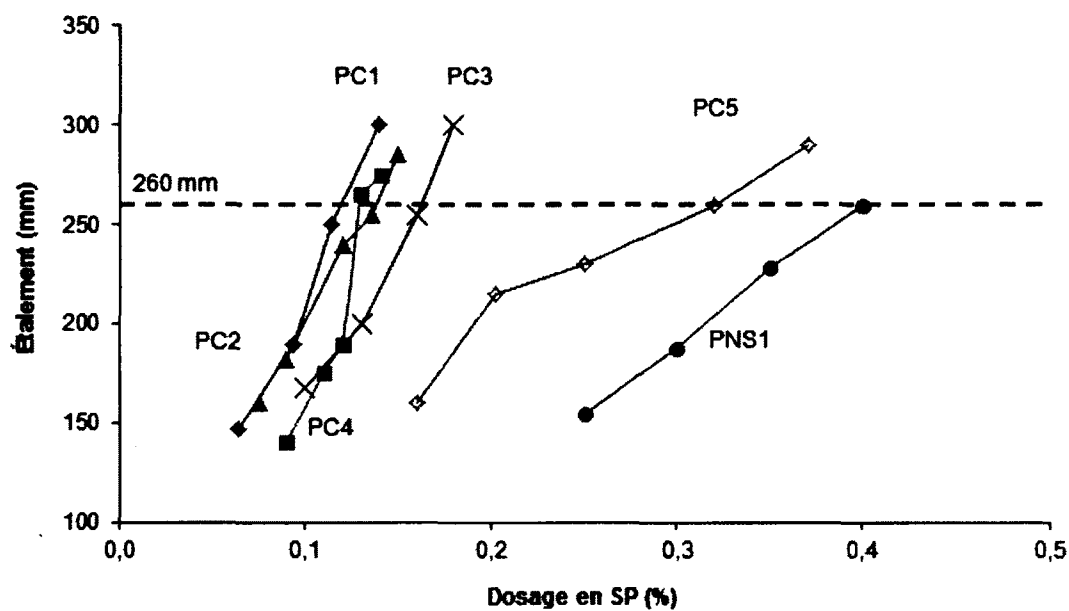
Les superplastifiants (SP) représentent un groupe très important d'adjuvants chimiques dont l'utilisation est incontournable dans les matériaux cimentaires d'haute fluidité. Ce chapitre présente les résultats de l'évaluation de l'effet de neuf différents superplastifiants sur les MBE de trois types de bétons fluides (BAP pour la construction des bâtiments, BAP pour la préfabrication et BSAP). Afin d'éliminer l'effet de volume d'air sur les propriétés du mortier, la teneur en air est contrôlée entre 0-1%. L'efficacité des superplastifiants étudiés en termes de dosage, ainsi que leur effet sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des MBE, est très différente. Ceci sera discuté un peu plus en détails ci-dessous.

4.1 Étude sur le MBE de BAP pour la construction des bâtiments (MBE-BAP-B)

Dans cette partie de l'étude, on a évalué la performance de six superplastifiants désignés pour l'application dans le BAP pour la construction des bâtiments (tableau 3.11), dont cinq à base de polycarboxylate (PC) et un à base de polynaphtalène sulfonate (PNS).

4.1.1 Propriétés rhéologiques initiales

Les figures 4.1 et 4.2 montrent l'effet de la variation du dosage en SP étudiés sur le diamètre d'étalement et le temps d'écoulement de MBE pour la construction des bâtiments. L'ajout de SP augmente le diamètre d'étalement et réduit le temps d'écoulement. Cet effet de SP était prévisible par leur capacité de dispersion. Cependant, il est intéressant de remarquer que les dosages requis pour préparer un MBE d'un diamètre d'étalement désiré (260 ± 10 mm) sont différents. Ces dosages pour PNS1 (0,4%) et pour PC5 (0,32%) sont relativement élevés comparativement aux dosages requis pour d'autres PNS (0,1% - 0,15%). Grâce aux efficacités de dispersion élevées, Un plus faible dosage pour PC est requis pour obtenir un certain niveau de maniabilité témoin.



*260 mm est la valeur de diamètre d'étalement désiré pour le MBE-BAP-B

Figure 4.1 : Variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en SP (poudre active extrait sec en % de la masse de liant) pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments

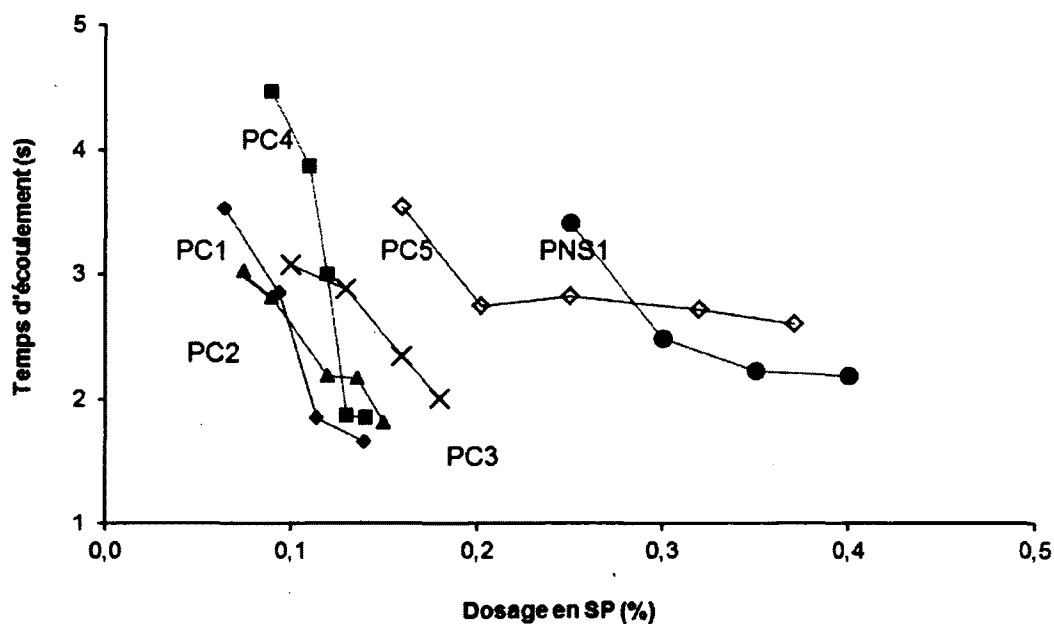


Figure 4.2 : Variation du temps d'écoulement au V-funnel en fonction de dosage en SP pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments

L'effet des SP sur les propriétés rhéologiques de MBE est présenté aux figures 4.3 et 4.4 respectivement. L'ajout des SP réduit le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, le même que l'effet sur le seuil de cisaillement semble être plus important. Tous les SP étudiés permettent de réduire la résistance à l'écoulement quasiment à zéro, ce qui est une condition nécessaire pour que le MBE ait le caractère autoplaçant. Le dosage en SP à employer pour obtenir un MBE de consistance autoplaçant varie d'un produit à l'autre et il est relié à leur efficacité. Par exemple, dans la figure 4.3, la demande en SP requise pour avoir le même seuil de cisaillement est trois fois plus grande dans le mortier avec le PNS1 (efficacité faible sur la diminution du seuil) qu'avec le PC1, PC2, PC3 ou PC4 (efficacité élevée). Le mortier avec le PC5 (efficacité moyenne) demande 2 fois plus de dosage en SP qu'avec les autres PC. Le même résultat est observé pour l'effet de SP sur la viscosité plastique dans la figure 4.4.

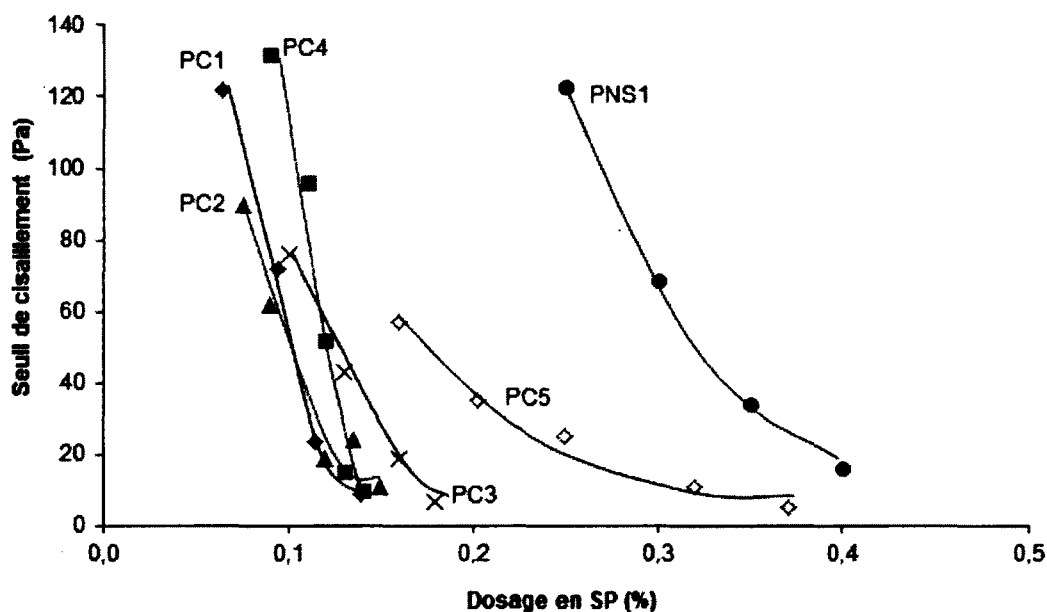


Figure 4.3 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de dosage en SP pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments

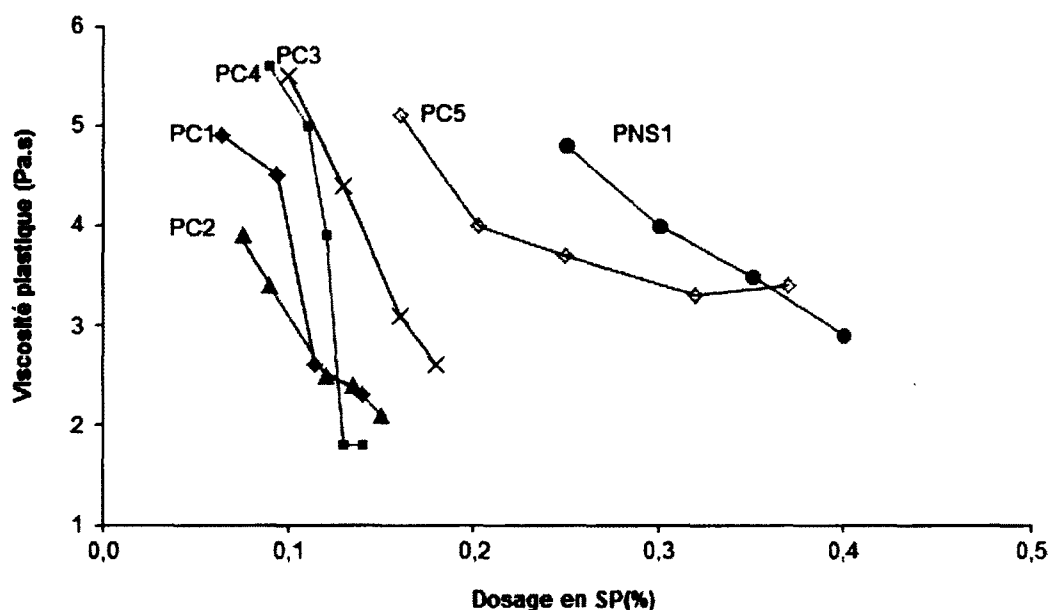


Figure 4.4 : Variation de la viscosité plastique en fonction de dosage en SP pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments

4.1.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

Dans le MBE-BAP-B, chaque type de SP possède un dosage optimisé qui permet d'obtenir l'étalement désiré, soit 260 ± 10 mm. Les résultats détaillés sur la perte de maniabilité et les variations du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique dans le temps (de 10 min à 60 min après contact eau-ciment) de ces six points optimisés sont présentée dans cette sous-section

La figure 4.5 montre que la perte de maniabilité dans le temps est différente par rapport au type de SP employé. La meilleure rétention d'ouvrabilité est obtenue par le mortier contenant le PC5. Ce mortier garde l'étalement quasiment constant pendant 60 min après le contact eau-ciment (efficacité élevée sur la rétention, de 260 mm à 280 mm). Par contre, le mortier contenant le PC4 perd rapidement de l'étalement (efficacité faible, de 260 mm à 150 mm). Les mortiers avec autres PC provoquent un effet entre PC5 et PC4 sur la rétention d'ouvrabilité dans le temps, les étalements se situent entre 180 mm et 200 mm jusqu'à 60 min après le contact eau-ciment (efficacité moyenne).

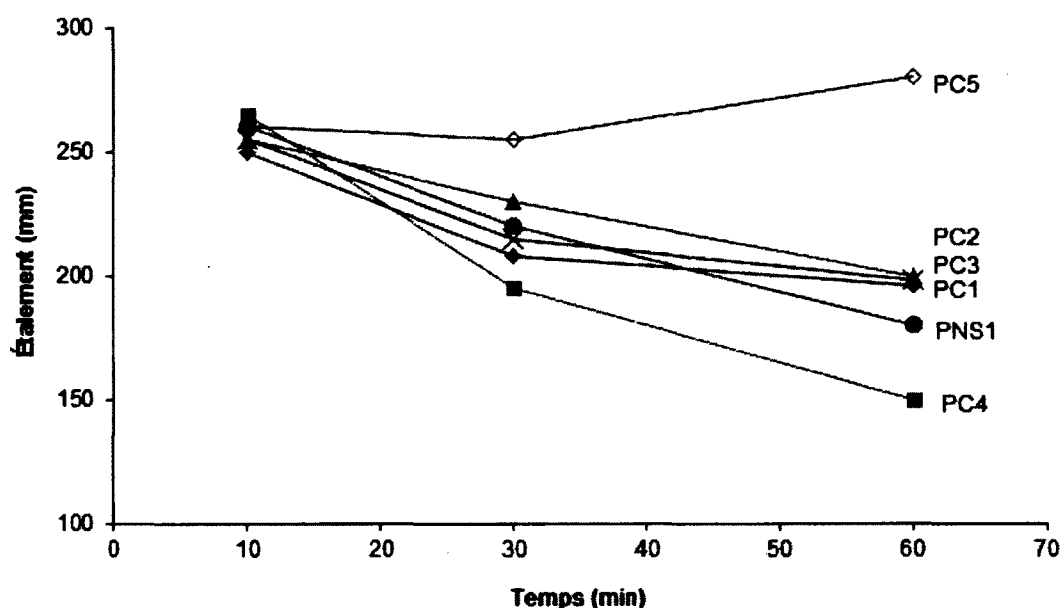


Figure 4.5 : Variation de l'étalement en fonction de temps pour un MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents types de SP

L'évolution du seuil de cisaillement dans le temps est présentée sur la figure 4.6. Étant donné que les étalements initiaux de mortiers avec différents SP sont similaires (260 ± 10 mm), les seuils initiaux sont donc semblable (10-20 Pa). La majorité des mortiers contenant du SP démontrent une augmentation du seuil de cisaillement dans le temps, sauf pour le mortier avec du PC5. Ce dernier ne change pas le seuil de cisaillement dans le temps (efficacité élevée sur la rétention). Mais le mortier avec PC4 augmente le plus rapidement le seuil dans le temps (efficacité faible, jusqu'à 100 Pa à 60 min), alors que les autres PC et PNS1 provoquent l'accroissement du seuil doucement (efficacité moyenne, jusqu'à 30 - 60 Pa à 60 min).

En outre, l'effet du SP sur la variation de la viscosité plastique dans le temps (figure 4.7) est différent de celui sur le seuil de cisaillement. Les viscosités initiales sont variables selon le type de SP utilisé dans le mortier. La variation de la viscosité de mortier avec le PC1 ou PC3 n'est pas significative dans le temps (efficacité élevée sur la rétention, < 0.5 Pa.s). Par contre, la variation de la viscosité du mortier avec le PC4 est la plus grande dans le temps (efficacité faible, > 2.5 Pa.s), alors que la viscosité des autres mortiers avec PC2, PC5 ou PNS1 augmente doucement dans le temps (efficacité moyenne, entre 0.5 et 1 Pa.s).

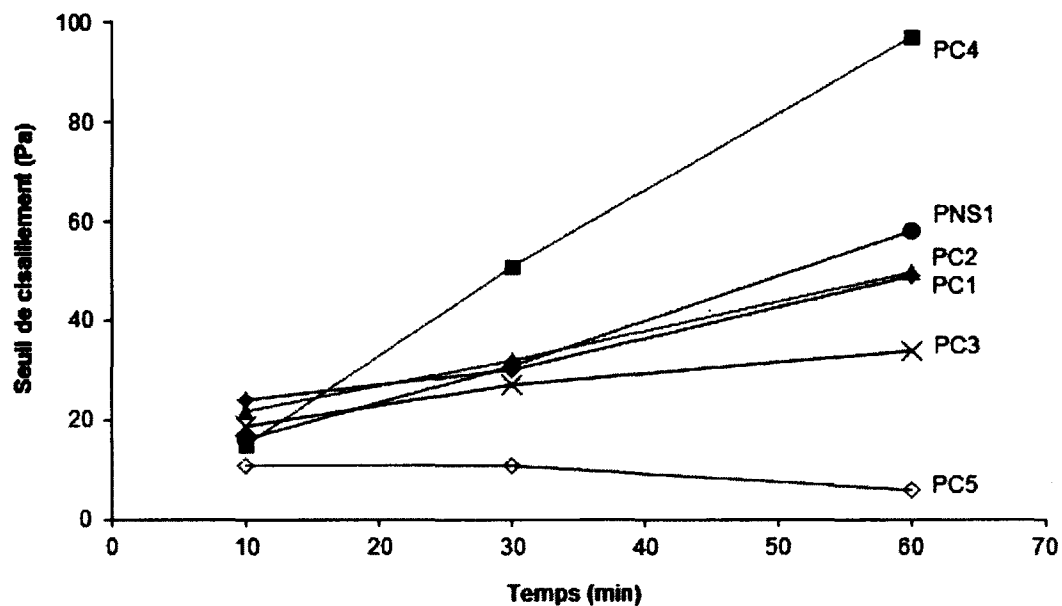


Figure 4.6 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du temps pour un MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents types de SP

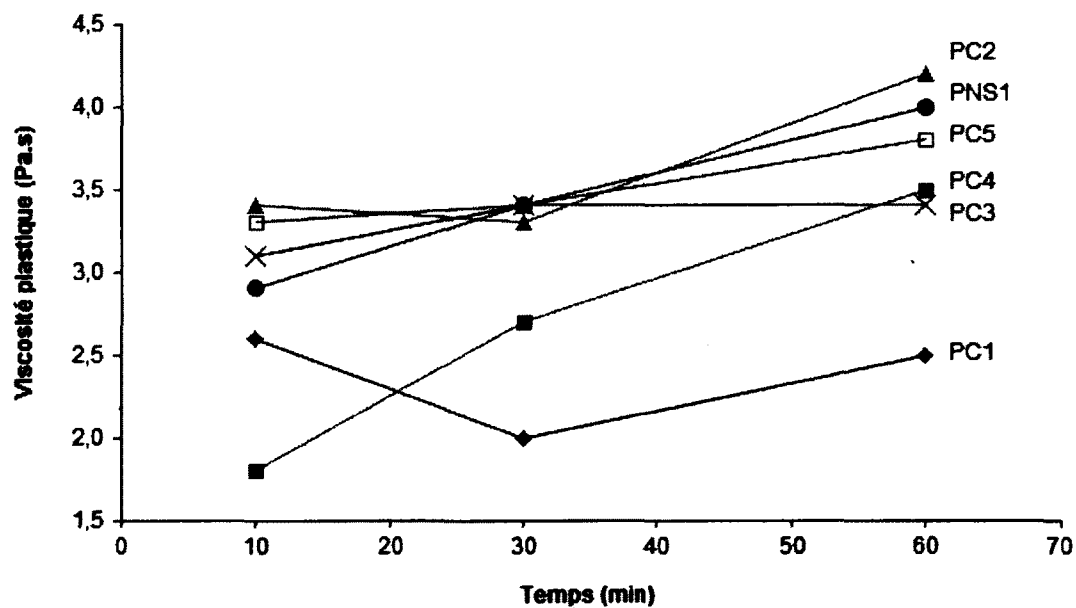


Figure 4.7 : Variation de la viscosité plastique en fonction du temps pour un MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents types de SP

4.1.3 Ressuage forcé

Le pourcentage de ressuaux forcés (RF %) est calculé par l'équation suivante :

$$RF (\%) = V_{\text{eau essorée}} / V_{\text{eau totale de l'échantillon}} \times 100$$

Le test de ressuaux forcés pour le MBE-BAP- B est fait sur des mélanges optimisés de MBE ayant un étalement de 260 ± 10 mm. Le mortier subit une pression de 100 psi, comme présenté sur la figure 4.8. Tous les mortiers avec le PC, donc le PC1, PC2, PC3 et PC4, ont des niveaux de ressuaux forcés similaires ($\pm 11\%$), tandis que le mortier avec le PNS1 provoque un ressuaux force plus petit (7%). En effet, le PC et le PNS dispersent les grains de ciment, ce qui assure une bonne compacité du système. Par conséquent, cette compacité réduit la perméabilité, donc le ressuaux forcé. La différence de ressuaux forcé entre l'utilisation du PC et du PNS dépend de différents modes d'action et leur pouvoir de dispersion, qui influencent la compacité du système. Dans cette partie de travail, l'utilisation de PNS1 dans le mortier possède une meilleure compacité du système que celle de PC.

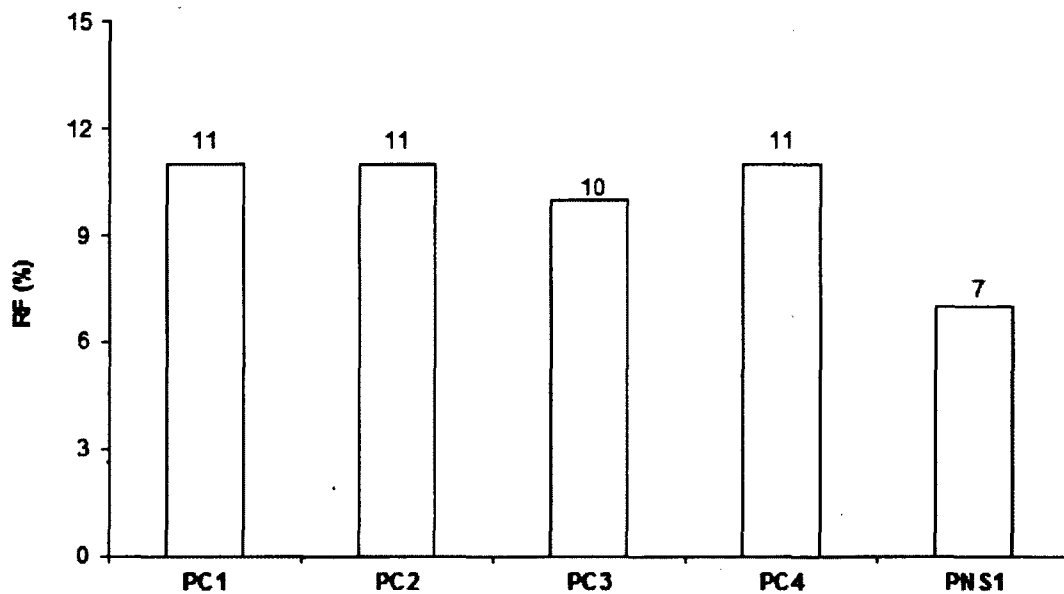


Figure 4.8 : Ressuaux forcés pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents types de SP

4.1.4 Propriétés mécaniques

Les résultats sur la résistance à la compression (f_c) à 1 jour, 7 jours, 28 jours et 91 jours après le contact eau-ciment sont présentés sur la figure 4.9 pour les mélanges optimisés (l'étalement = 260 ± 10 mm) avec six types de SP. On peut y voir qu'il n'y a pas significativement d'effet du SP sur la f_c à 1 jour sauf pour le mortier contenant le PC2 (efficacité élevée sur l'augmentation de la f_c , 21 MPa), ce dernier mélange possédant 30% de plus de f_c que les autres mortiers. Tandis qu'après 7, 28 et 91 jours, la f_c peut atteindre respectivement 35, 50 et 65 MPa. La variation de la compression durant la même période est inférieure à 10%. Il n'existe pas de différence sur la f_c entre le mortier avec PC ou PNS à long terme.

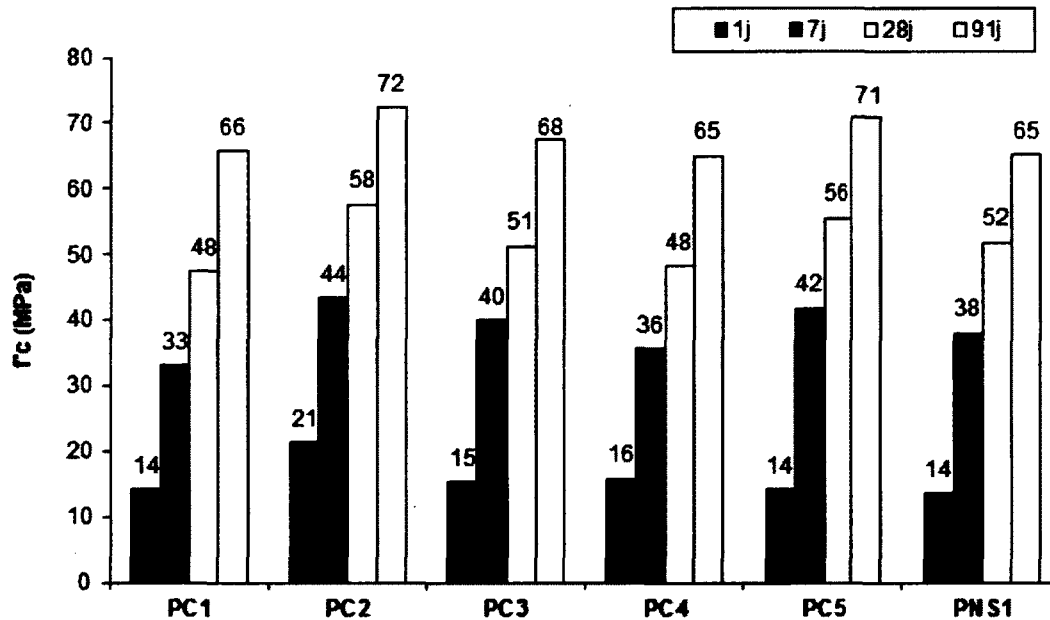


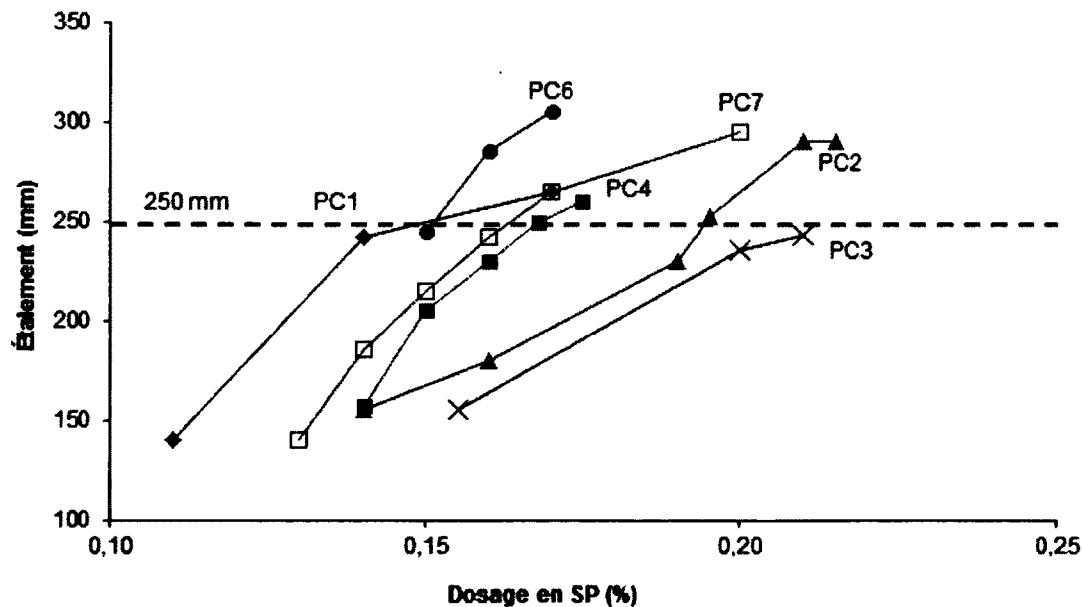
Figure 4.9 : Résistance à la compression à 1, 7, 28 et 91 jours pour le MBE correspondant au BAP-B avec différents types de SP (teneur en air de MBE < 1%)

4.2 Étude sur MBE de BAP pour la préfabrication (MBE-BAP-P)

Dans cette partie d'étude, la performance de six SP (tous sont dans la famille de PC) a été évaluée, désignés pour l'application dans le BAP pour la préfabrication (tableau 3.11).

4.2.1 Propriétés rhéologiques initiales

L'effet de variation du dosage en SP sur la maniabilité (le diamètre d'étalement) du MBE-BAP-P est montré dans la figure 4.10. L'ajout de ces six PC augmente la maniabilité du mortier. Son efficacité sur la maniabilité est quasiment identique. Afin d'avoir un étalement optimisé (± 250 mm), les demandes en SP se situent entre 0,15% - 0,2%. Les mortiers avec le PC2 ou PC3 demandent un peu plus de dosage en SP (efficacité faible sur l'augmentation de la fluidité, 0,2%); par contre ceux avec le PC1 ou PC6 ont besoin de moins de SP (efficacité élevée, 0,15%) afin d'avoir le même étalement, alors que la demande en SP pour les mortiers avec PC4 ou PC7 se situe entre les autres SP (efficacité moyenne, 0,17%).



*250 mm est la valeur de diamètre d'étalement désiré pour le MBE-BAP-P

Figure 4.10 : Variation du diamètre d'étalement en fonction de dosage en SP pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication

Les figures 4.11 et 4.12 montrent respectivement l'effet du dosage en SP sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Tous les SP employés dans le MBE-BAP-P permettent de diminuer le seuil de cisaillement jusqu'à zéro. L'effet de SP sur le seuil est lié à l'effet sur la maniabilité. Par conséquent, l'efficacité des différents SP sur le seuil de cisaillement est quasiment similaire à leur effet sur la maniabilité. Le seuil de cisaillement des mortiers avec le PC1, PC4, PC6 ou PC7 diminue rapidement avec l'augmentant du dosage en SP (efficacité élevée sur la diminution du seuil). Pour ceux avec le PC2 ou PC3, le seuil de cisaillement diminue un peu plus lentement que pour les autres mélanges (efficacité moyenne). L'augmentation du dosage en SP améliore la maniabilité et diminue le seuil, mais son effet sur la viscosité du mélange n'est pas très significatif (figure 4.12). Pour le mortier avec un étalement supérieur de 150 mm, en augmentant le dosage en SP, la diminution de la viscosité est inférieure de 20% sauf pour le mortier avec le PC1. La valeur de la viscosité dépend plutôt du type de SP employé dans le mortier.

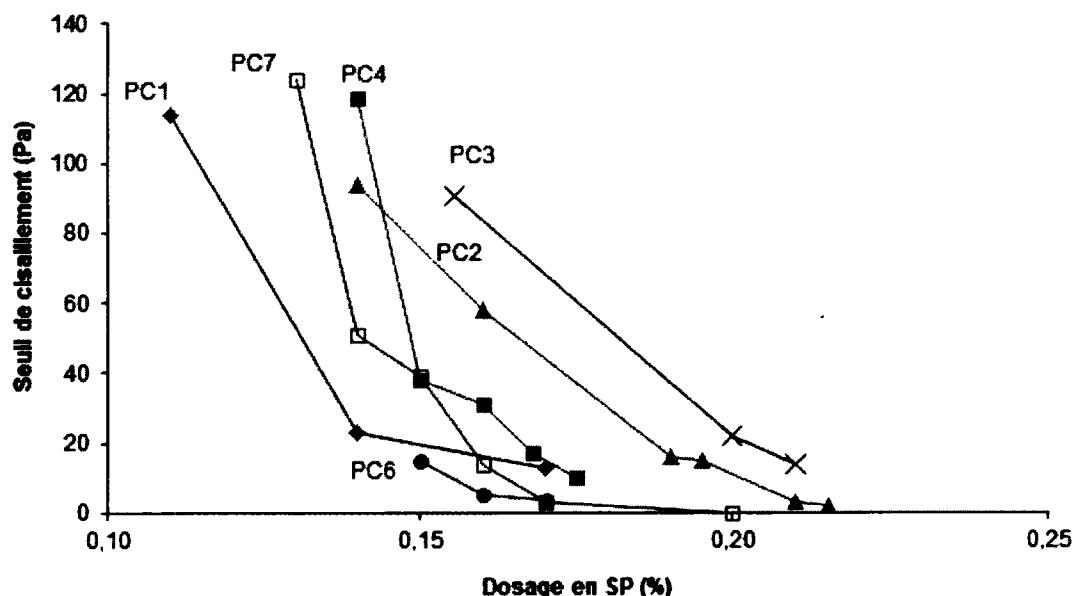


Figure 4.11 : Variation du seuil en fonction de dosage en SP pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication

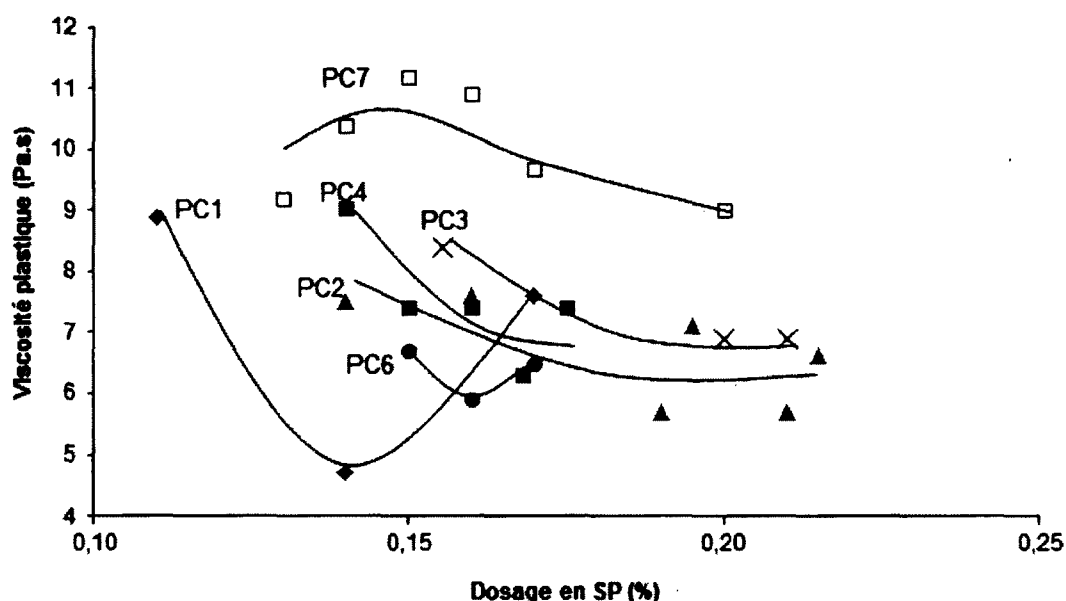


Figure 4.12 : Variation de la viscosité en fonction de dosage en SP pour MBE correspondant au BAP pour la préfabrication

4.2.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

Dans les MBE-BAP-P, chaque type de SP utilisé possède un dosage optimisé qui permet d'obtenir l'étalement désiré, soit 260 ± 10 mm. Une étude dans le temps (10, 30 et 60 minutes après le contact eau-ciment) sur la maniabilité et les propriétés rhéologiques à l'état frais sont étudiés dans cette sous-section.

La perte de maniabilité dans le temps, soit la perte d'étalement, est présentée sur la figure 4.13. Tous les types de PC employés démontrent une perte de maniabilité dans le temps pour le MBE-BAP-P. Cependant, le mortier contenant du PC4 perd plus l'étalement (efficacité faible sur la rétention, de 250 mm à 100 mm) que celui contenant PC3 (efficacité élevée, de 250 mm à 220 mm), alors que les mortiers contenant les autres PC comme PC1, PC2, PC6 ou PC7, provoquent une perte de maniabilité entre ces deux mélanges (efficacité moyenne, de 250 mm à 180-200 mm).

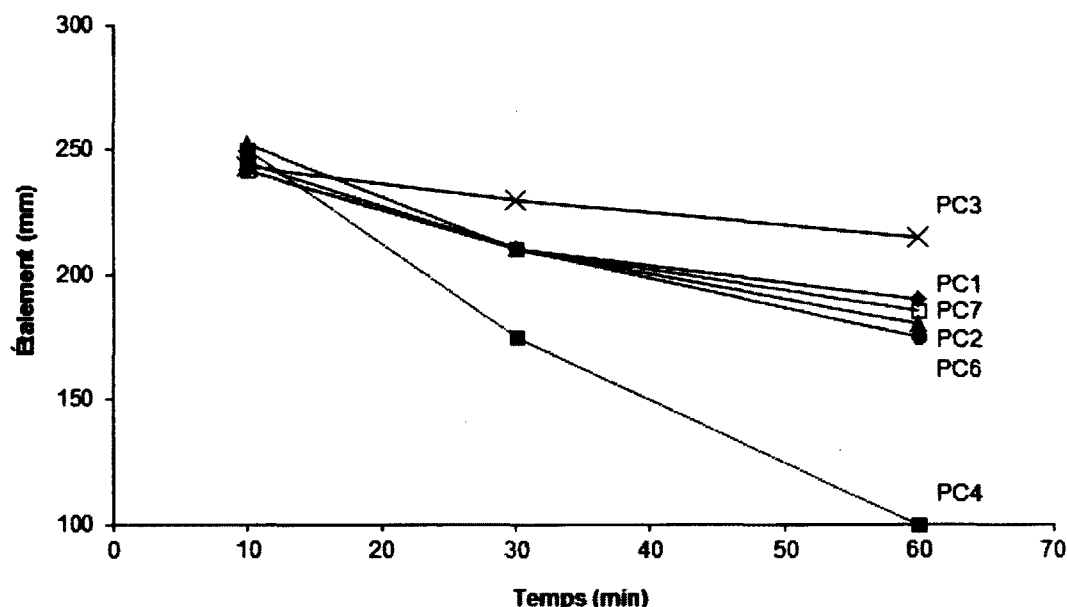


Figure 4.13 : Variation de l'étalement en fonction de temps pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents types de SP

L'évolution des propriétés rhéologiques dans le temps est liée à la perte de maniabilité, comme il a été discuté précédemment. Étant donné que les étalements initiaux des mortiers avec différents SP sont similaires (250 ± 10 mm), les seuils de cisaillement initiaux le sont aussi (10-20 Pa). La figure 4.14 montre que le seuil de cisaillement augmente avec le temps. L'efficacité des différents SP sur le seuil dans le temps est similaire à celle sur la maniabilité. Donc c'est encore le mortier avec le PC4 qui augmente le plus le seuil dans le temps (efficacité faible sur la rétention de seuil, jusqu'à 250 Pa) que ceux avec les autres PC (efficacité élevée, jusqu'à 30 - 50 Pa). Et le mortier avec le PC3 donne très peu de changement (jusqu'à 20 Pa), ce qui démontre qu'il a une bonne rétention du seuil dans le temps.

La variation de la viscosité plastique dans le temps est présentée sur la figure 4.15. En effet, pour les mortiers avec un étalement initial identique, le seuil initial est quasiment identique, mais la viscosité plastique initiale peut avoir des grands écarts. De plus, dans le temps, la viscosité du mortier a augmenté : PC4 augmente le plus la viscosité, 200% par rapport à la viscosité initiale (efficacité faible sur la rétention de viscosité); PC2, PC6 et PC7 provoquent l'accroissement de la viscosité vers 10% (efficacité moyenne); PC1 et PC3 gardent bien la rétention de la viscosité dans le temps, la variation étant inférieure de 10% (efficacité élevée).

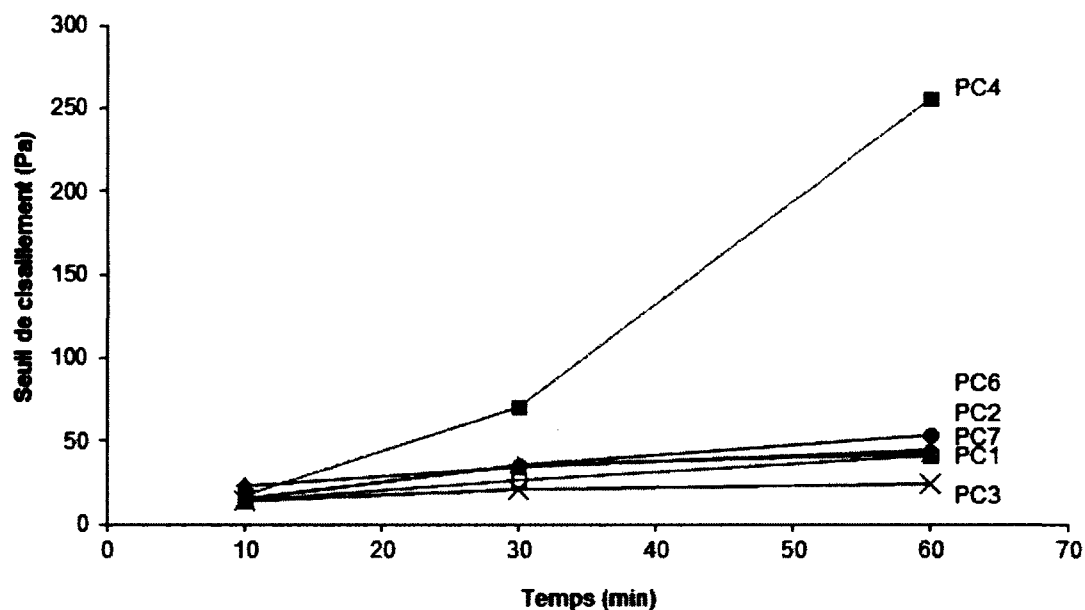


Figure 4.14 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de temps pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents types de SP

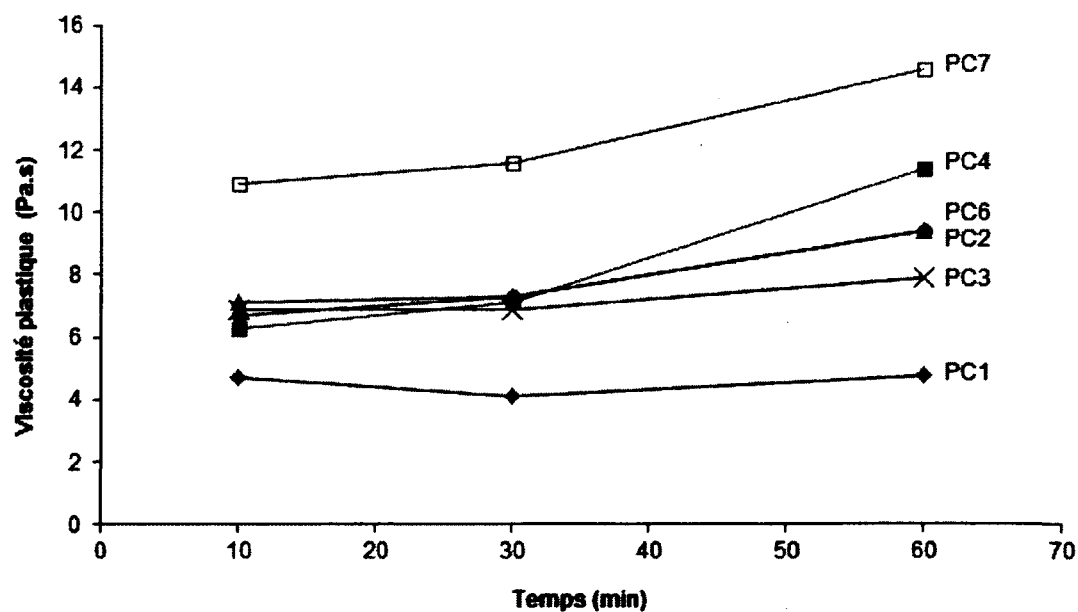


Figure 4.15 : Variation de la viscosité plastique en fonction de temps pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents types de SP

4.2.3 Ressuage forcé

Le ressuage forcé (RF) de MBE-BAP- P est testé dans les mélanges optimisés de MBE ayant un étalement de 250 ± 10 mm. Le mortier subit une pression de 100 psi, comme présenté dans la figure 4.16. Tous les mortiers avec le PC ont des niveaux de ressuage forcé similaires ($\pm 8\%$).

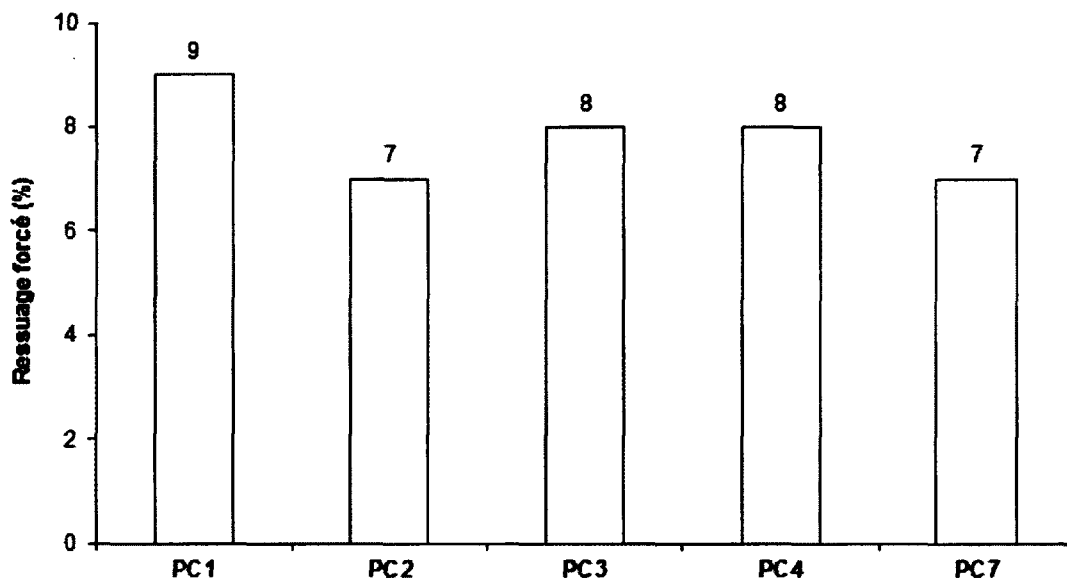


Figure 4.16 : Ressuage forcé pour le MBE correspondant à BAP pour la préfabrication avec différents types de SP

4.2.4 Propriétés mécaniques

Pour les mélanges optimisés (étalement de 250 ± 10 mm), les résultats de la résistance à la compression (f'_c) à 1, 7, 28 et 91 jours après le contact eau-ciment sont présentés sur la figure 4.17. Cette figure montre que la f'_c à 1 jour du mortier contenant le PC2 ou PC6 (efficacité élevée sur la f'_c) est 45% supérieure à celles des mortiers avec les autres PC, tandis qu'après 7, 28 et 91 jours, il n'y a pas d'effet significatif du SP sur la f'_c de MBE-BAP-P. Les valeurs sont d'environ de 20, 40, 60 et 70 MPa pour la résistance de 1, 7 et 28 et 91 jours, respectivement.

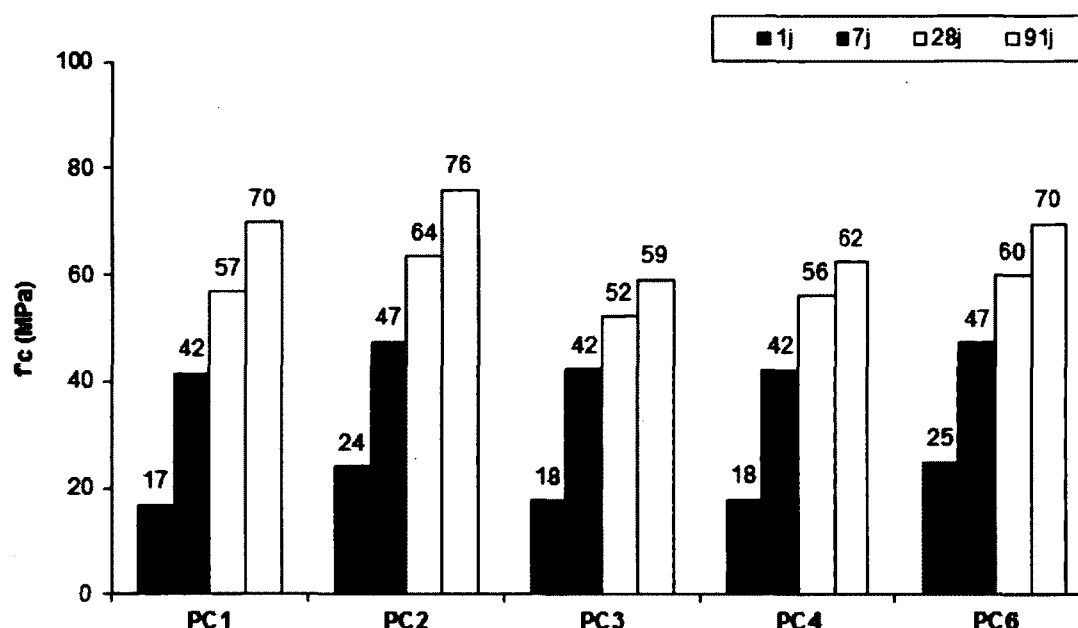


Figure 4.17 : Résistance à la compression à 1, 7, 28 et 91 jours pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents types de SP (teneur en air de MBE < 1%)

4.3 Étude sur le MBE de béton semi-autoplaçant pour infrastructure (MBE-BSAP)

Dans cette partie d'étude, on a étudié la performance de quatre SP (trois types de PC et un type de PNS), désignés pour l'application dans le béton semi-autoplaçant (tableau 3.11).

4.3.1 Propriétés rhéologiques initiales

Le béton semi-autoplaçant est un type de béton avec un étalement compris entre celui du béton conventionnel et celui du BAP. Afin d'analyser l'efficacité du SP dans le MBE-BSAP, on a étudié quelques dosages en SP qui aident à varier un étalement entre 100 mm et 200 mm (figure 4.18). L'ajout de SP augmente la maniabilité du mortier. MR1 est un type de SP recommandé spécialement dans le BSAP. Pour obtenir un étalement fixé (140 mm), la demande en SP est plus faible ($\pm 0,15$ %) pour le PC1 et le MR1, donc il est plus efficace que les autres SP. Le mortier contenant le PNS1 demande le plus de SP (efficacité faible, 0,40 %), et le PC5 possède un effet moyen sur l'efficacité (0,32 %).

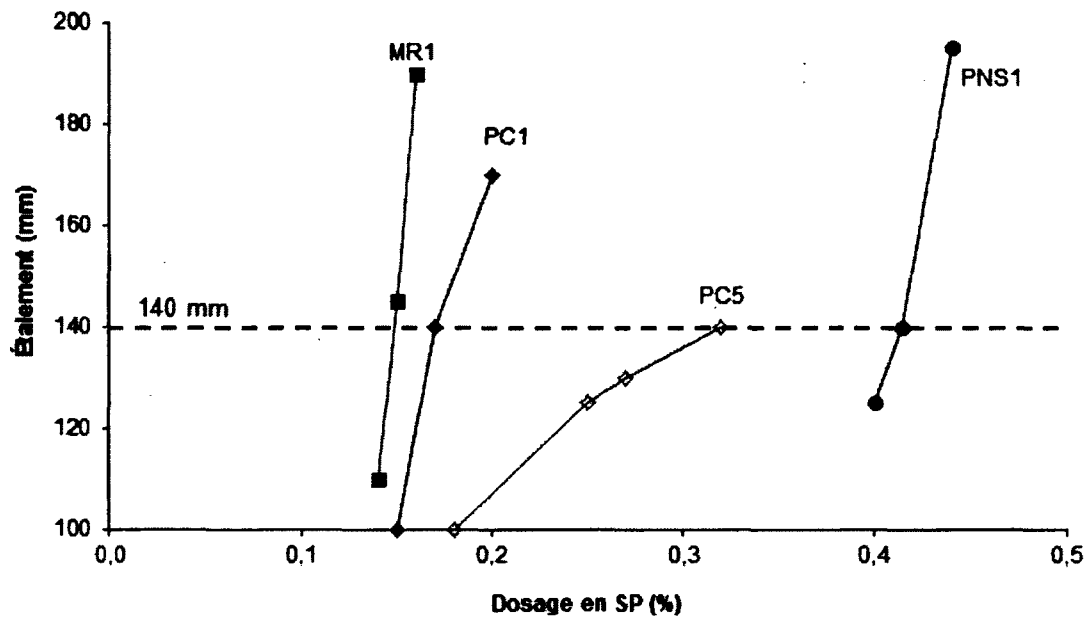


Figure 4.18 : Variation du diamètre d'étalement en fonction de dosage en SP pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure

Le seuil de cisaillement du MBE-BSAP diminue avec l'augmentant du SP, comme on peut le voir sur la figure 4.19. Pour obtenir un seuil fixe, les mortiers avec le PC1 ou MR1 demandent moins de SP. Le dosage de PNS1 doit être plus grand dans le mortier. Le PC5 a un effet moyen sur le seuil.

Comme on peut le voir sur la figure 4.20, la viscosité plastique du MBE-BSAP est très grande (> 10 Pa). Sa valeur peut être variée (augmentée ou diminuée) en augmentant le dosage en SP. La figure 4.20 montre nettement que la viscosité du mortier avec MR1 diminue rapidement (> 50 % par rapport à la viscosité initiale) en augmentant le dosage de SP (efficacité élevée), mais les mortiers contenant du PC1, PC5 et PNS1 ne donnent pas d'effet significatif sur la viscosité (< 20 %).

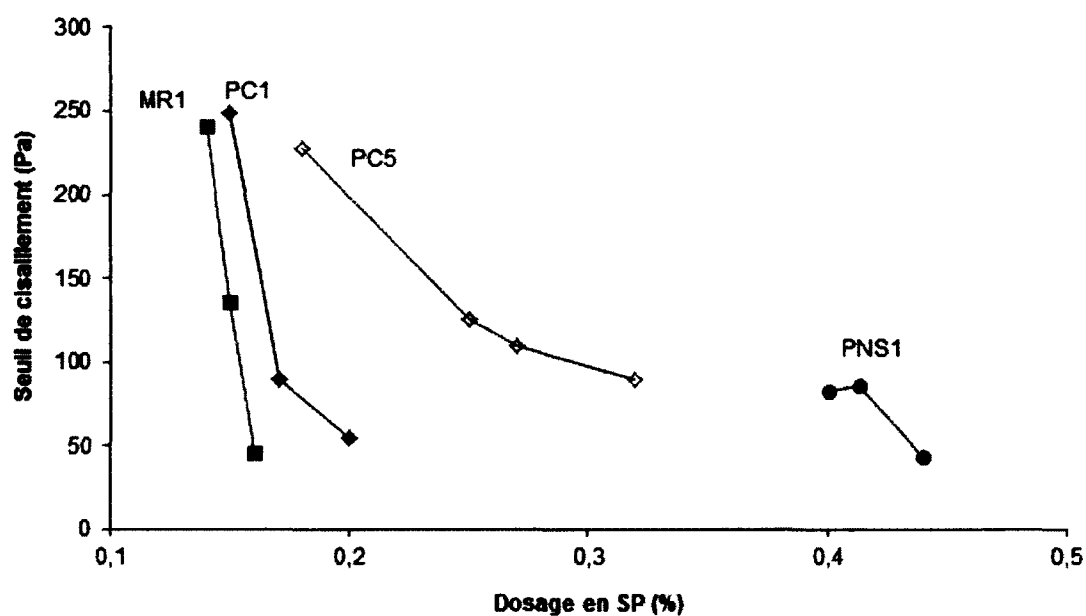


Figure 4.19 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du dosage en SP pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure

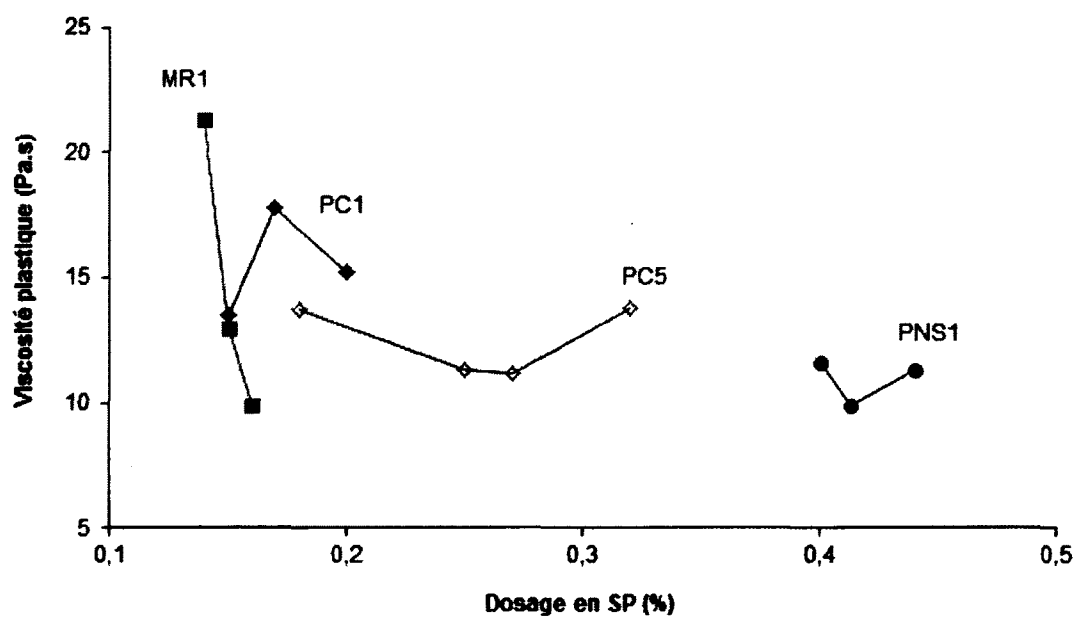


Figure 4.20 : Variation de la viscosité en fonction du dosage en SP pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure

4.3.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

Cette sous-section portera sur l'étude de la maniabilité et des propriétés rhéologiques à l'état frais dans le temps (10, 30 et 60 minutes après le contact eau-ciment) de ses mélanges optimisés (étalement = 140 mm – 170 mm). La perte de maniabilité dans le temps est présentée sur la figure 4.21. Le mortier contenant du PC5 garde son étalement pendant 60 min (efficacité élevée sur la rétention), alors que les mortiers avec PNS1, MR1 ou PC1 perdent plus de maniabilité, 25 % par rapport l'étalement initial (efficacité moyenne).

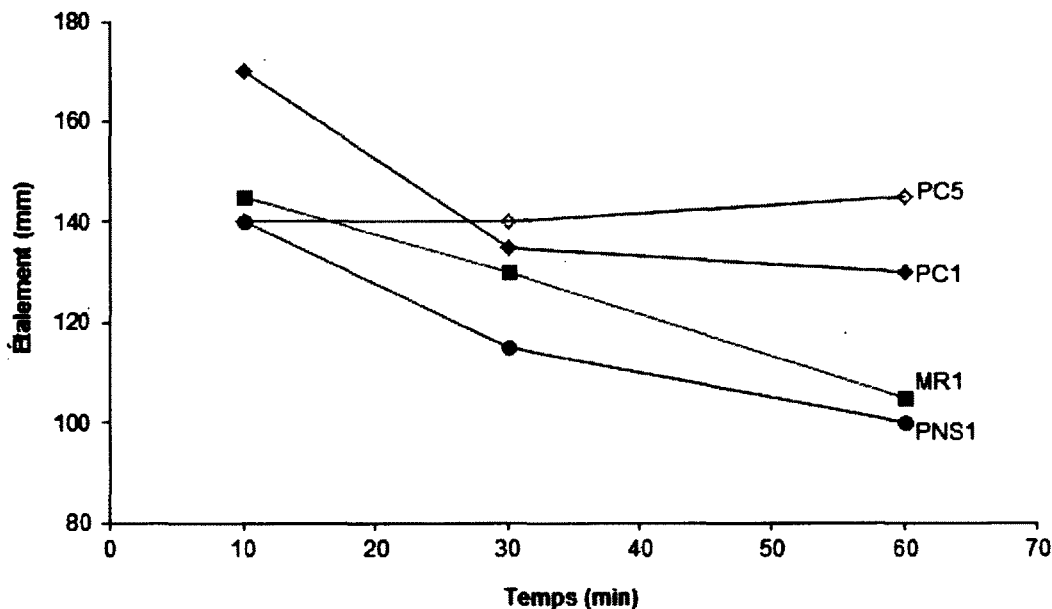


Figure 4.21 : Variation de l'étalement en fonction de temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents types de SP

Les propriétés rhéologiques telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont présentés respectivement sur les figures 4.22 et 4.23. L'augmentation du seuil du MBE-BSAP est similaire à celui de la perte de maniabilité dans le temps. Le mortier diminue davantage l'étalement, son seuil de cisaillement augmente davantage, et vice versa.

La figure 4.23 montre que la viscosité plastique augmente généralement dans le temps sauf pour le PC5. Ce dernier mélange possède une viscosité constante dans le temps (efficacité élevée sur la rétention). La viscosité du mortier avec PNS1 augmente davantage (60 % par rapport la viscosité initiale). Les mortiers avec le MR1 ou PC1 provoquent 30 % d'augmentation de la viscosité dans le temps (efficacité moyenne).

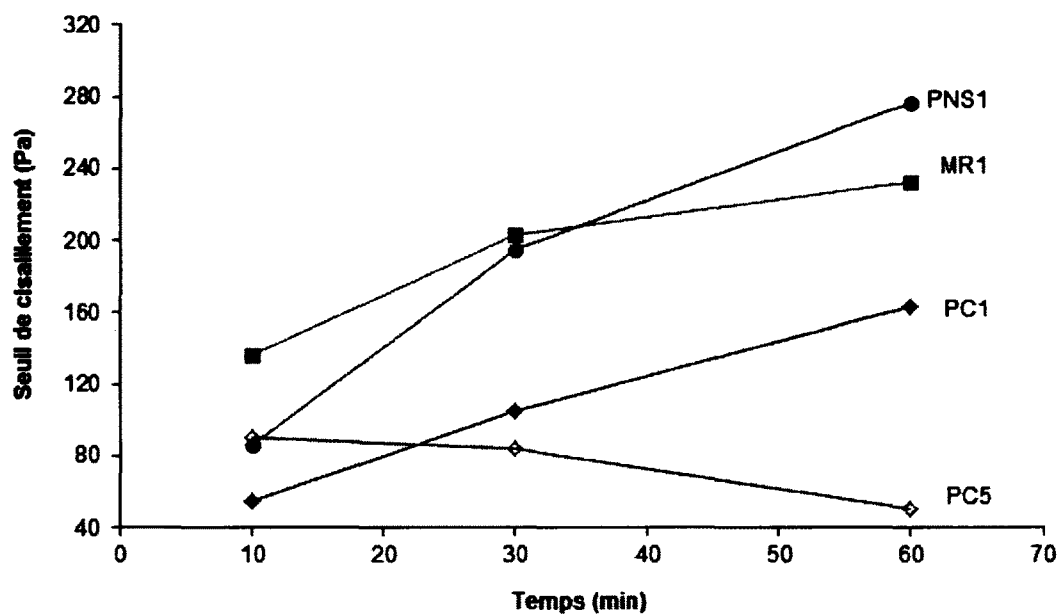


Figure 4.22 : Variation du seuil en fonction de temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents types de SP

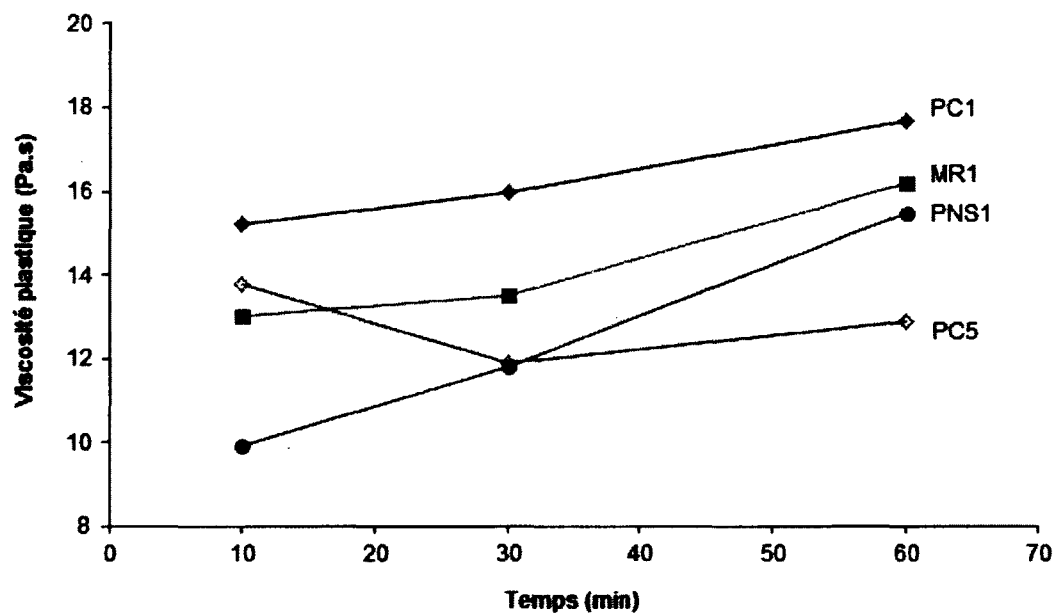


Figure 4.23 : Variation de la viscosité en fonction de temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents types de SP

4.3.3 Propriétés mécaniques

Les résultats de la résistance à la compression à 1, 7, 28 et 91 jours après le contact eau-ciment sont présentés sur la figure 4.24. Il n'y a pas significativement d'effet du SP sur la résistance à jeune âge sauf pour celle avec PNS1. La f_c à 1 jour du mortier avec PNS1 est 30% plus petite que les autres (efficacité faible sur la f_c). Jusqu'à long terme, cet effet de type de SP sélectionné dans le mortier peut négliger. Ces valeurs sont respectivement d'environ 22, 42, 55 et 65 MPa pour la résistance à 1, 7, 28 et 91 jours.

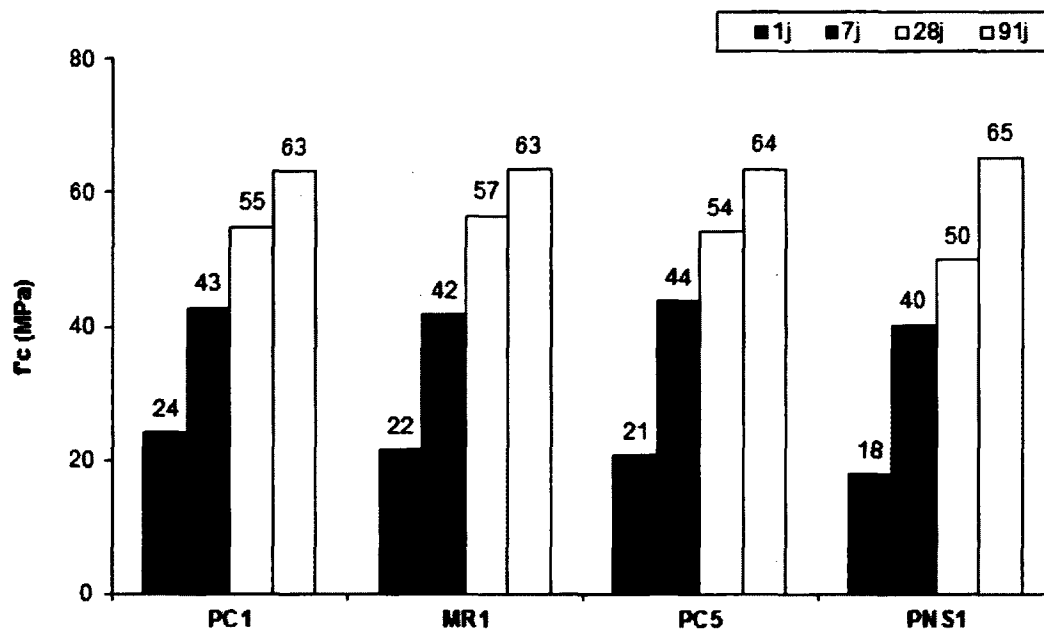


Figure 4.24 : Résistance à la compression à 1, 7, 28 et 91 jours pour le MBE correspondant à BSAP pour l'infrastructure avec différents types de SP (teneur en air de MBE < 1%)

4.4 Discussions

Cette section montre la comparaison et la discussion d'effet de SP sur les propriétés de trois types de MBE à rhéologie adaptée (MBE-BAP-B, MBE-BAP-P et MBE-BSAP). Le rapport E/L, la teneur en liant et la teneur en sable sont différentes dans ces trois types de composition de MBE, comme présenté dans le tableau 3.10.

4.4.1 Propriétés rhéologiques initiaux

Dans le cas de toutes ces compositions de MBE, tous les types de SP peuvent diminuer le seuil de cisaillement, ceci s'entraînant une amélioration de la maniabilité. En comparaison, la variation du diamètre d'étalement en fonction du dosage en SP (figures 4.1, 4.10 et 4.18), les SP, tels que PC et PNS sont classés de la même manière. Ils gardent la même efficacité dans les différentes compositions du mortier. La demande en PNS est toujours supérieure à celle du PC (sauf PC5) de plus de 200 %. En effet, la différence d'efficacité entre le PNS et le PC est due au mode de dispersion. Le PC excite la défloculation par répulsion électrostatique et par répulsion stérique, mais le PNS disperse les grains de ciment seulement par répulsion électrostatique. En outre, la demande en PC5 est plus grande que celle des autres PC. Elle est juste 25 % plus petite que la demande en PNS. Cette différence entre les PC dépend de la longueur de la chaîne principale et la quantité de chaîne secondaire, dont la structure de molécule du PC.

Les propriétés rhéologiques des différents mortiers dont le seuil de cisaillement en fonction de la viscosité plastique sont présentées dans les figures 4.25, 4.26 et 4.27. Dans chaque type de mortier, l'augmentation du dosage en SP sélectionné provoque une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. Cette diminution du seuil est 10 fois plus grande que celle de la viscosité, car le SP réduit principalement le seuil. Dans le MBE-BSAP, la variation de la viscosité n'est pas significative ($< 30\%$) sauf pour le mélange avec le MR1 ($> 100\%$). D'ailleurs, la viscosité de MBE-BSAP (10-20 Pa.s) est 4 fois plus grande que celle de MBE-BAP-B (2-5 Pa.s) et 2 fois plus grande que celle de MBE-BAP-P (6-10 Pa.s). Ceci dépend seulement des divers paramètres de compositions (E/L, teneur en liant et teneur en sable). De plus, selon un seuil de cisaillement (ou maniabilité) fixe, les viscosités dépendent du type de SP employé dans le mortier et elles sont classées de la même manière dans les différentes compositions de mortier. Par exemple, au même seuil, la viscosité des mélanges avec le PC2,

dans le MBE-BAP-B ou dans le MBE-BAP-P, sont toujours plus grandes que celle avec les autres SP. Ce type de PC peut être recommandé dans les applications où une faible viscosité est désirée (facilité de pompage). Par contre, la plus grande viscosité apparaît dans le mélange avec le PC5 pour MBE-BAP-B et celui avec le PC7 pour MBE-BAP-P. Ces deux types de SP peuvent être utilisés dans le cas où la viscosité est demandée (ex : pour éviter la ségrégation).

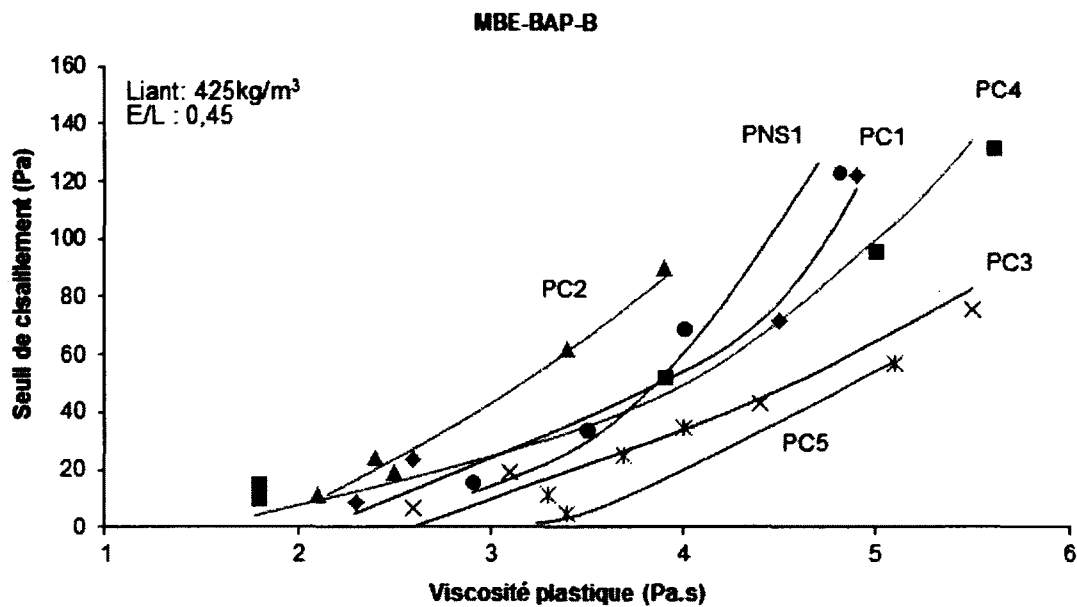


Figure 4.25 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la viscosité plastique en augmentant le dosage en SP pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments

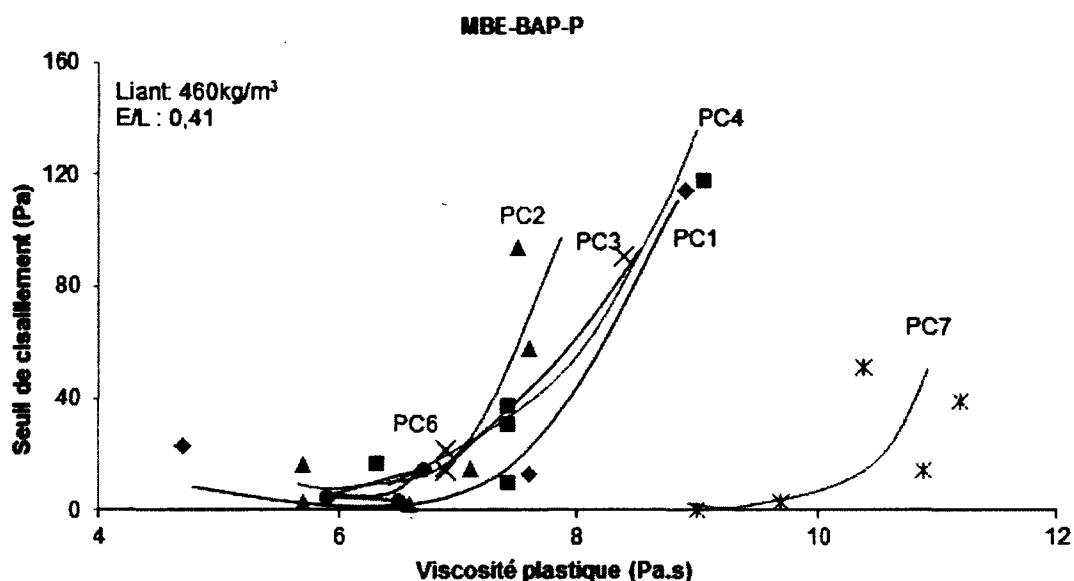


Figure 4.26 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la viscosité plastique en augmentant le dosage en SP pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication

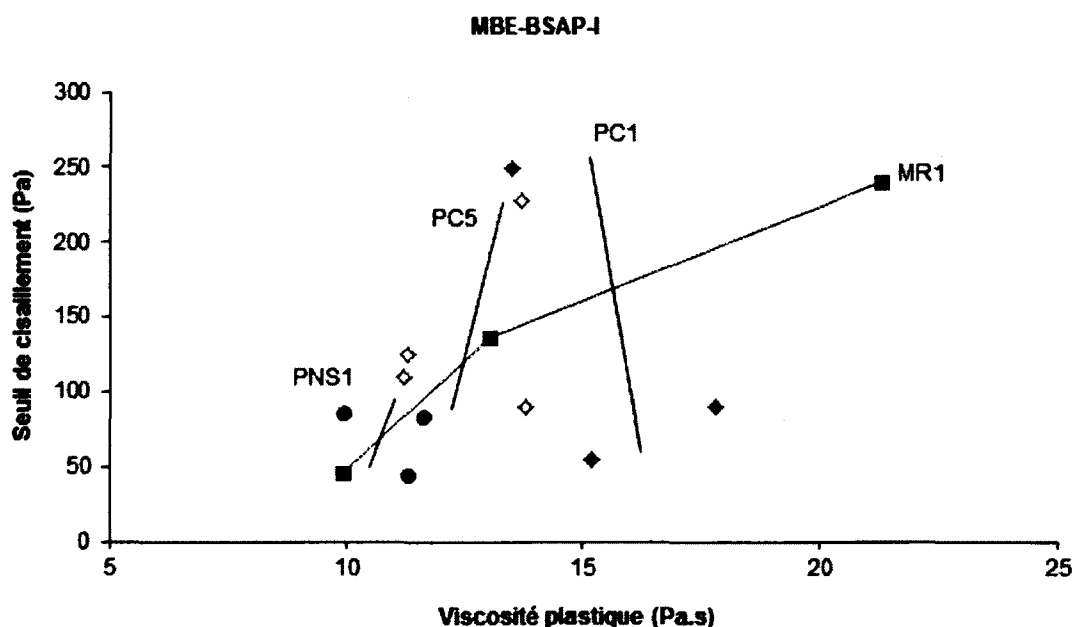


Figure 4.27 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la viscosité plastique en augmentant le dosage en SP pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure

4.4.2 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

La perte de maniabilité (en pourcentage %) dans le temps (de 10 min à 60 min après le contact eau-ciment) est calculé par l'équation suivante:

$$\text{Perte de maniabilité (\%)} = (\phi_{10 \text{ min}} - \phi_{60 \text{ min}}) / \phi_{10 \text{ min}} \times 100$$

ϕ : étalement

La perte de maniabilité dépend du type de SP employé dans le mortier, présenté dans les figures 4.28, 4.29 et 4.30. Dans les différents MBE ayant le même type de SP, la même tendance de la perte de maniabilité est observée. Par exemple, le mélange avec le PNS1 perd plus de 30% de maniabilité que les PC sauf PC4. En effet, le PNS est constitué des molécules à structure linéaire, qui s'absorbent «à plat» à la surface des grains de ciment, du fait de la constante formation d'hydrates après le gâchage du mélange. Ces derniers recouvrent immédiatement les molécules PNS, annulant de ce fait leur action fluidifiante. La perte de maniabilité de mélange avec le PNS1 dépend aussi de la masse des molécules et de leur capacité d'absorption (Aitcin et coll., 2001) (Kim et coll., 2000). D'ailleurs, la perte de maniabilité des mélanges avec du PC4 est toujours 100 % plus grande que celle des mélanges avec les autres PC. Par contre, c'est toujours PC5 qui garde le mieux la rétention de maniabilité (-8 % dans le MBE-BAP-B et 0 % dans le MBE-BSAP). Il peut être appliqué sur le chantier lorsque l'on a besoin d'une grande maniabilité après le contact eau-ciment. Les grosses molécules avec la chaîne principale et secondaire se prolongent dans l'eau, il faut plus de temps pour que les hydrates du ciment viennent les recouvrir et ainsi l'effet fluidifiant s'en trouve prolongé. La différence entre le mortier avec les PC peut être expliquée par la structure des molécules (Felekoglu et Sarikahya, 2008) et leur compatibilité avec le ciment.

Les différentes propriétés rhéologiques du mortier dans le temps, liées à la perte de maniabilité, dépendent du type de SP employé. Nous obtenons donc une augmentation du seuil dans le temps similaire à celle de la perte de maniabilité. Elle peut être due à la perte d'efficacité du SP dans le temps et à la diminution de l'eau libre par l'hydratation.

Une diminution régulière de la viscosité est observée dans chaque type de mortier. Mais cette diminution est 10 fois plus petite que celle du seuil. En plus, dans le MBE-BSAP, quelques SP ne donnent plus une diminution de viscosité significative.

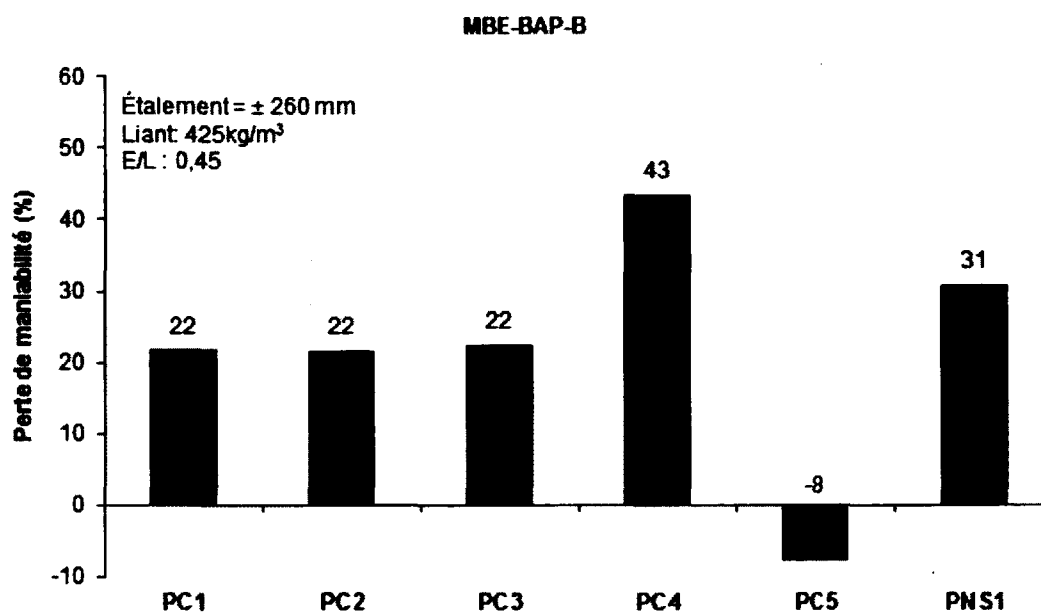


Figure 4.28 : Perte de maniabilité après 60 min pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents types de SP

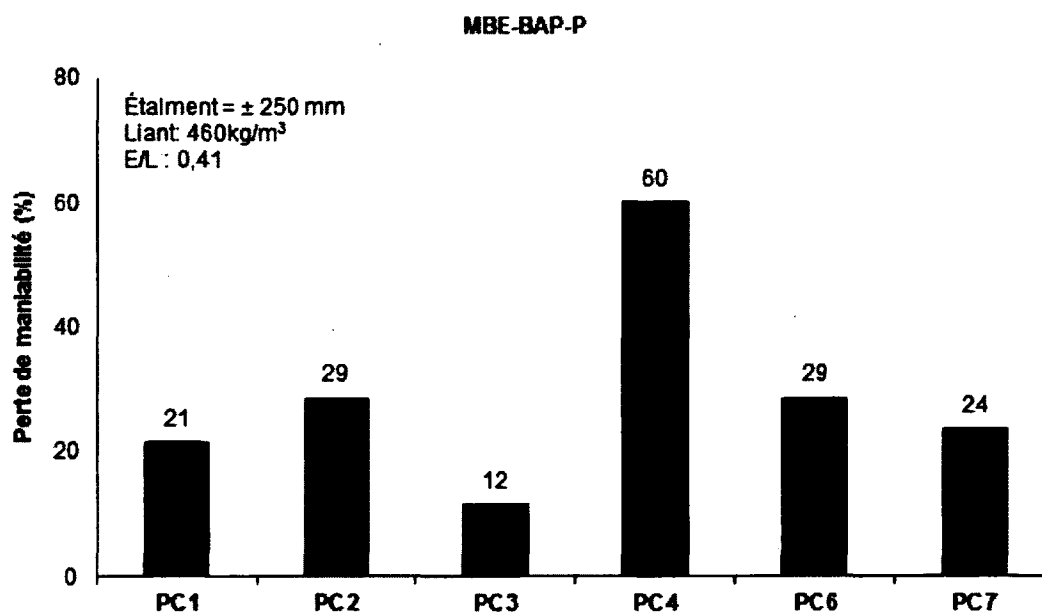


Figure 4.29 : Perte de maniabilité après 60 min pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents types de SP

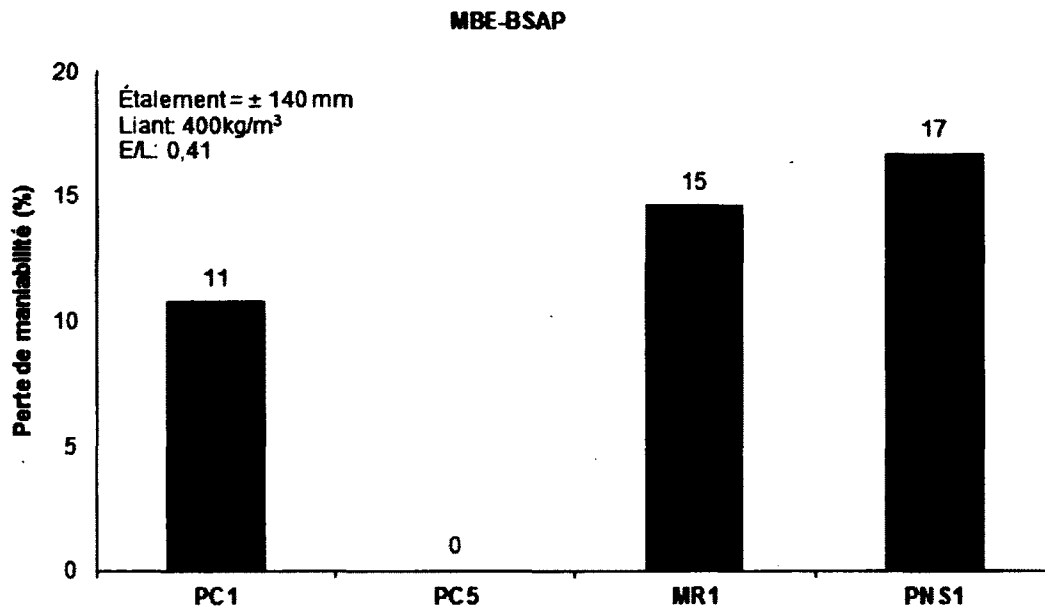


Figure 4.30 : Perte de maniabilité après 60 min pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents types de SP

4.4.3 Ressuage forcé

Le ressuage forcé du MBE-BAP-B contenant les PC est similaire (11 %) et plus grand que celui du MBE-BAP-P (8 %). Ceci dépend du plus faible rapport E/L du MBE-BAP-P (0,41) que celui du MBE-BAP-B (0,45).

4.4.4 Propriétés mécaniques

Afin d'obtenir des résultats comparables de l'effet SP sur la résistance à la compression (f_c), la teneur en air est contrôlée à moins de 1 % et la condition de mûrissement est identique pour tous les mortiers. En comparaison entre les figure 4.9, 4.17 et 4.23, les f_c à jeune âge (1 jour) sont légèrement différentes selon les différents types de SP sélectionnés dans le mortier, les SP gardent le même effet sur la f_c dans les différentes compositions du mortier. Par exemple, le PC2 dans le MBE-BAP-B ou MBE-BAP-P donne toujours 40% de plus de f_c à jeune âge que les mortiers avec autres types de SP. Entre les PNS et PC, il n'y a pas grande différence d'effet sur la f_c . En outre, la f_c à long terme pour trois types de MBE est quasiment similaire, il n'y a pas d'effet significatif en SP.

4.5 Conclusions

Nous avons étudié l'évaluation de l'influence des SP en fonction de trois types de MBE. Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 résument le comportement de la fluidité, des propriétés rhéologiques, de la résistance à la compression et des variations dans le temps de ces 3 types de MBE.

- Tous les SP sélectionnés réduisent principalement et rapidement le seuil de cisaillement. Pour le BAP, 0,01% de plus de SP provoque plus de 10 Pa de la diminution du seuil. Cette efficacité de SP sur le seuil de cisaillement dépend du type de SP employé dans le MBE.
- Les SP sélectionnés affectent aussi la diminution de la viscosité de MBE, mais la diminution de la viscosité plastique est 10 fois plus petite que celle du seuil de cisaillement.
- L'utilisation de PC2 ou de PNS est recommandée dans les applications où une faible viscosité est désirée (facilité de pompage).
- L'utilisation de PC5 et PC7 (MBE de viscosité élevée) est plus appropriée quand le risque de ségrégation est important.
- Le PC5 doit être considéré pour les applications où une rétention de la maniabilité prolongée est requise.
- L'utilisation de PC2 et PC6 produit les résistances à jeune âge 40 % supérieurs aux autres PC. Long terme, l'effet de SP sur la f'_c n'est pas significatif.

Tableau 4.1 : Effets des SP sur les propriétés de MBE-BAP-B

MBE-BAP-B	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PNS1
Augmentation de la fluidité	I	I	I	I	II	III
Diminution du seuil	I	I	I	I	II	III
Diminution de la viscosité	I	I	I	I	II	III
Amélioration de la rétention de la fluidité dans le temps	II	II	II	III	I	II
Amélioration de la rétention du seuil dans le temps	II	II	II	III	I	II
Amélioration de la rétention de la viscosité dans le temps	I	II	I	III	II	II
Résistance à la compression	-	I	-	-	-	-

Tableau 4.2 : Effets des SP sur les propriétés de MBE-BAP-P

MBE-BAP-P	PC1	PC2	PC3	PC4	PC6	PC7
Augmentation de la fluidité	I	III	III	II	I	II
Diminution du seuil	I	II	II	I	I	I
Diminution de la viscosité	III	III	III	III	III	III
Amélioration de la rétention de la fluidité dans le temps	II	II	I	III	II	II
Amélioration de la rétention du seuil dans le temps	I	I	I	III	I	I
Amélioration de la rétention de la viscosité dans le temps	I	II	I	III	II	II
Résistance à la compression	-	I	-	-	I	-

Tableau 4.3 : les effets de SP sur les propriétés de MBE-BSAP

MBE-BSAP	PC1		MR1		PC5	PNS1
Augmentation de la fluidité	I		I		II	III
Diminution du seuil	I		I		II	III
Diminution de la viscosité	I		-		-	-
Amélioration de la rétention de fluidité dans le temps	II		II		I	II
Amélioration de la rétention de seuil dans le temps	II		II		I	II
Amélioration de la rétention de la viscosité dans le temps	II		II		I	II
Résistance à la compression	-		-		-	III

I : Efficacité élevée

II : Efficacité moyenne

III : Efficacité faible

- : Peu d'effet

CHAPITRE 5

Effet de la combinaison superplastifiant/agent viscosité sur les propriétés des mortiers de béton équivalents

Dans le domaine du béton fluide, afin de garder la fluidité et la stabilité du béton, il est nécessaire d'incorporer un agent de viscosité (VEA) et un superplastifiant (SP) dans le mélange. Ce chapitre présente les résultats de l'évaluation d'effet des différentes combinaisons de dix SP et trois VEA sur les mortiers de béton équivalents (MBE) de trois types de bétons fluides (BAP pour la construction des bâtiments, BAP pour la préfabrication et BSAP). Les effets de différentes combinaisons de SP/VEA sur les caractéristiques à l'état frais ainsi qu'à l'état durci sont étudiés pour l'identifier les problèmes de compatibilité SP/VEA. Une faible quantité d'agent désentraineur d'air est incorporée dans les mortiers pour contrôler la teneur en air du mortier ($< 1\%$) dans cette partie du travail.

5.1 Étude sur le MBE de BAP pour la construction des bâtiments (MBE-BAP-B)

Dans cette partie de l'étude, six combinaisons de SP/VEA avec quatre dosages en VEA fixes (sans, faible, moyen, élevé) sont désignées par l'application dans le BAP pour la construction des bâtiments (tableau 3.12).

5.1.1 Demande en superplastifiant (SP)

La demande en SP pour un étalement initial de 260 ± 10 mm est présentée dans la figure 5.1. Dans le cas du MBE sans VEA, la demande en PNS est 2 fois supérieure à celle du PC, comme expliqué dans le chapitre 4. Cette différence entre les SP peut être due au mode de dispersion ainsi qu'à la structure des chaînes moléculaires. En outre, en augmentant le dosage en VEA, la demande en SP est également augmentée afin de garder le même étalement initial. Cette augmentation en SP (ΔSP) dépend fortement du type de combinaison employé. Pour la combinaison PNS1+VEA23, une très faible augmentation du dosage en SP par rapport à l'augmentation du dosage en VEA ($\Delta SP/\Delta VEA$), inférieur de 10 %, est observée lorsque le

dosage en VEA augmente (efficacité élevée). Par contre, pour les autres combinaisons PC/VEA, le $\Delta SP/\Delta VEA$ est de 100 % supérieur (Efficacité moyenne).

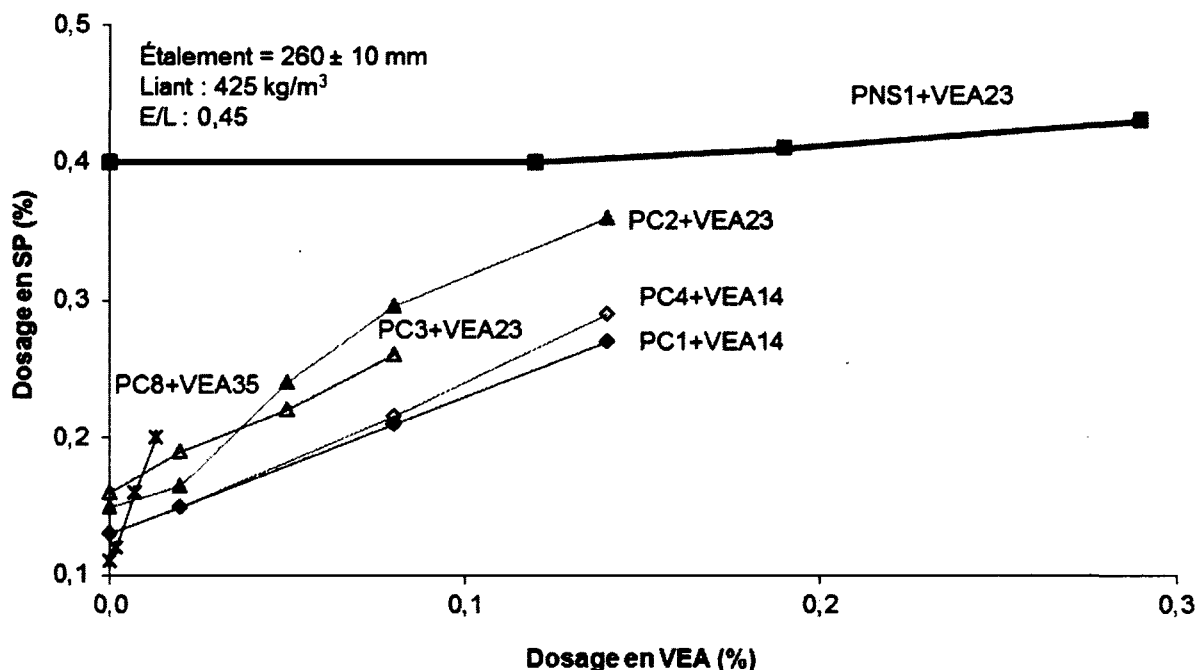


Figure 5.1 : Variation du dosage en SP en fonction du dosage en VEA pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.1.2 Propriétés rhéologiques initiales

Les variations des propriétés rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité plastique) du MBE-BAP-B contenant différents dosages en VEA sont présentées dans les figures 5.2 et 5.3, respectivement. Toutes les combinaisons de SP/VEA avec ces différents dosages en VEA donnent un seuil de cisaillement presque identique (10-30 Pa) quand l'étalement est constant ($\phi = \pm 260$ mm). En effet, il existe une faible différence entre les seuils de cisaillement des différentes combinaisons. Lorsque la teneur en adjuvant augmente, la majorité des combinaisons PC/VEA diminue légèrement le seuil, mais la fluidité du mélange n'est pas variée. Par contre, les combinaisons PC8+VEA35 et PNS1+VEA23 provoquent un faible accroissement

du seuil. De plus, la variation du seuil dans le MBE-BAP-B compris entre 10 et 30 Pa peut être négligeable (efficacité faible). Cependant, il convient de noter que l'effet de la combinaison de SP/VEA sur la rhéologie du mortier se conforme à la viscosité. En augmentant le dosage en VEA, même si le dosage en SP augmente également, la viscosité du MBE-BAP-B avec tous les types de combinaisons augmente. Cette augmentation de la viscosité pour la combinaison PNS1+VEA23 (efficacité élevée sur l'augmentation de la viscosité, 3 à 9 Pa.s) est plus grande que celle de PC/VEA (efficacité moyenne, 2 à 5 Pa). De plus, pour quelques combinaisons PC/VEA (PC1+VEA14 et PC4+VEA14), à dosage en VEA élevé, la viscosité peut être diminuée à cause de la grande quantité de SP dans le mélange.

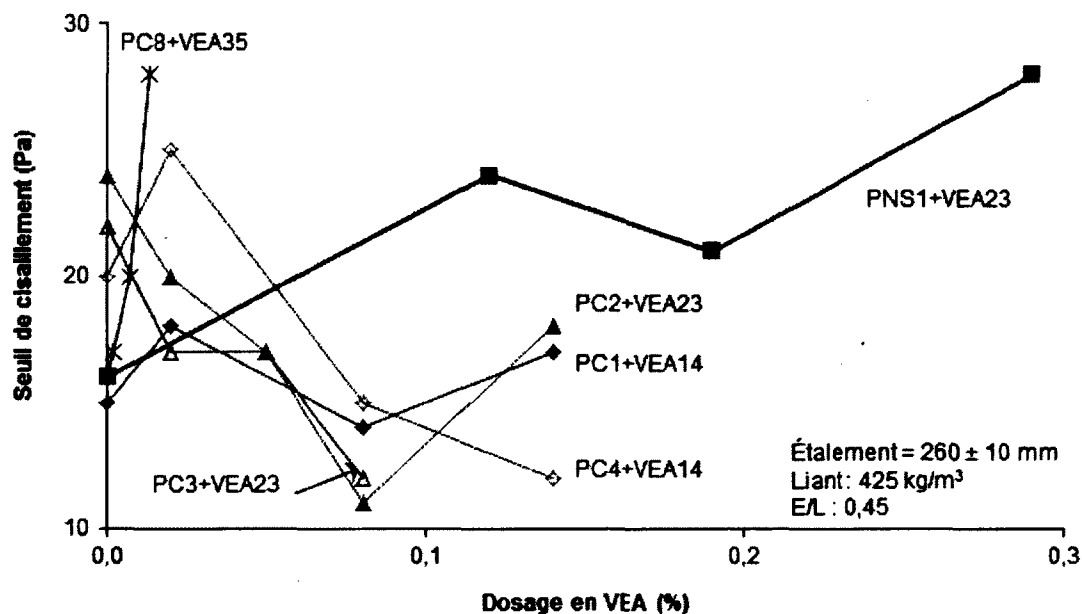


Figure 5.2 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du dosage en VEA pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA

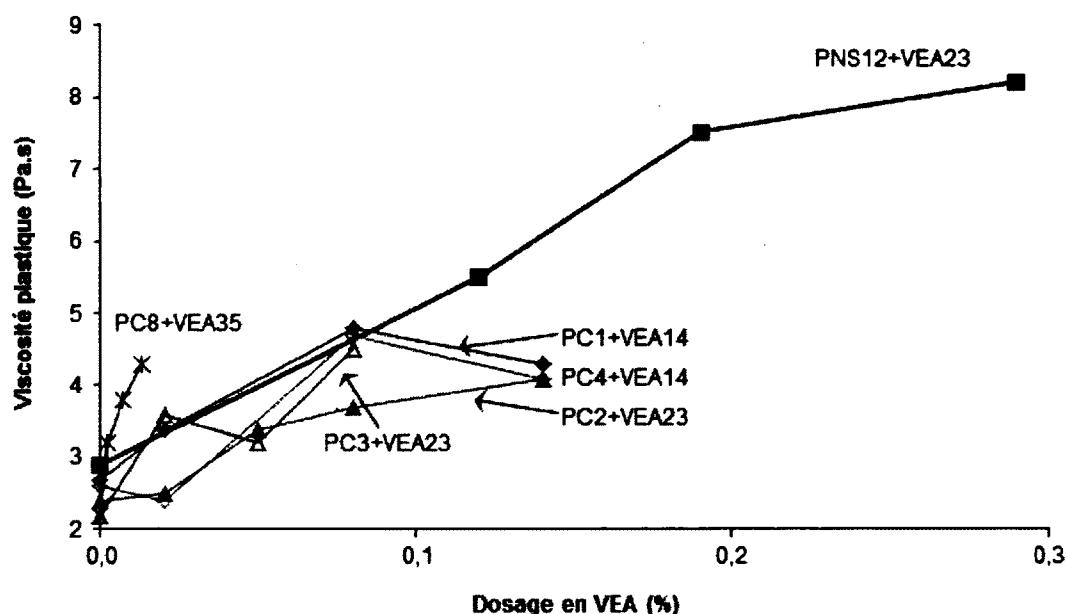


Figure 5.3 : Variation de la viscosité en fonction du dosage en VEA pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.1.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

Suite à l'hydratation du ciment, il y a une perte de la maniabilité dans le temps: l'étalement diminue, le seuil de cisaillement augmente et la viscosité plastique augmente. Ce phénomène est similaire à l'effet du SP dans le temps, expliqué dans le chapitre précédent. En ajoutant le VEA, la demande en SP augmente pour garder le même étalement, la rétention d'ouvrabilité est donc améliorée, comme le montre les figures 5.4, 5.5 et 5.6 pour la combinaison PC1/VEA14. Plus on ajoute des adjuvants, moins il y a de changement dans l'étalement et le seuil avec le temps. Par contre, la quantité de VEA dans le mortier n'influence que la viscosité initiale, l'accroissement de la viscosité dans le temps pour les différents dosages en VEA du mortier est presque similaire. Le dosage en VEA n'a donné aucun effet significatif sur la variation de la viscosité dans le temps. Toutes les autres combinaisons d'adjuvants provoquent les mêmes effets sur la rétention des propriétés rhéologiques (Annexe A, figure A.1).

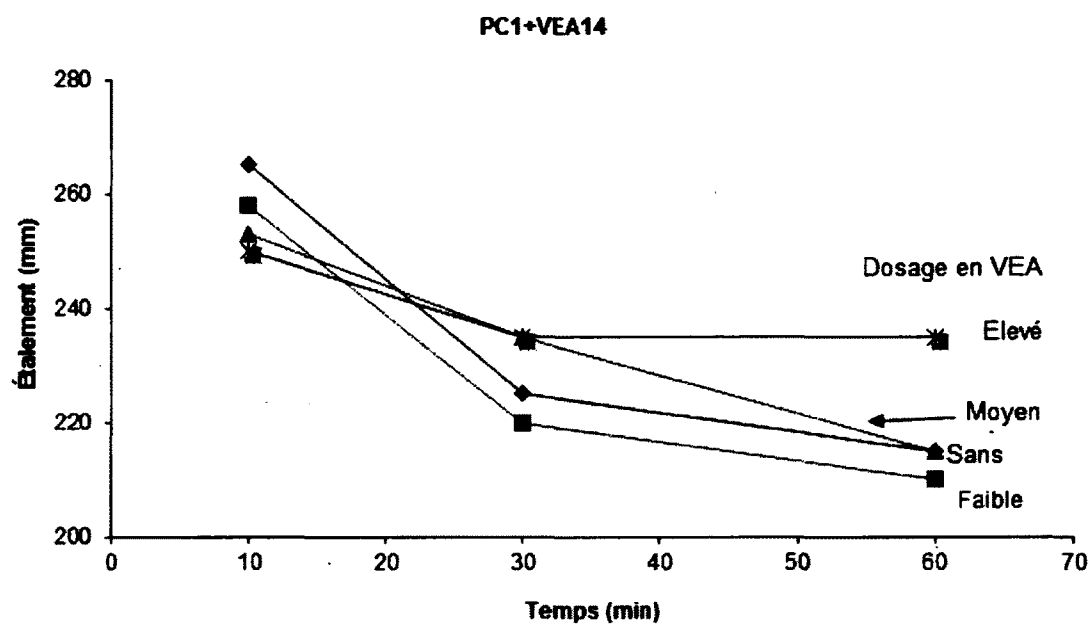


Figure 5.4 : Variation de l'étalement en fonction du temps pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents dosages en VEA pour le PC1+VEA14

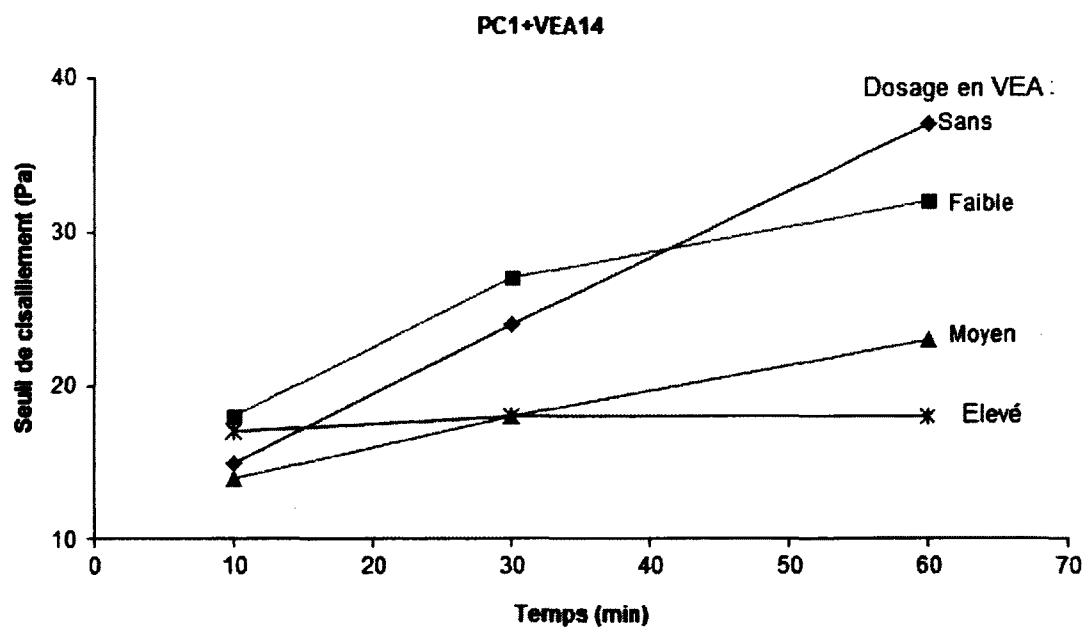


Figure 5.5 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du temps pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents dosages en VEA pour le PC1+VEA14

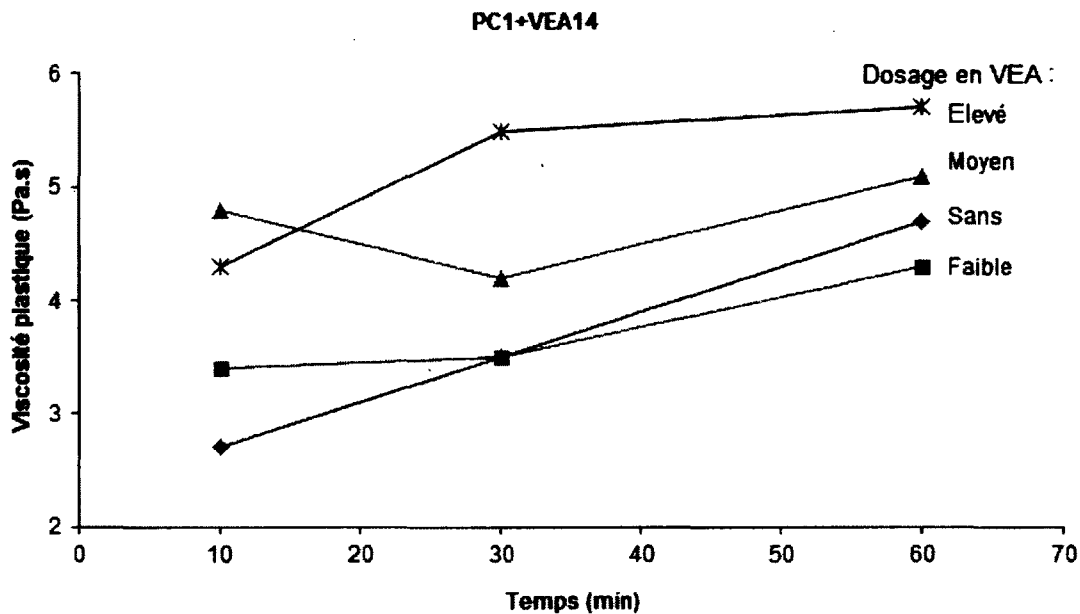


Figure 5.6 : Variation de la viscosité en fonction du temps pour MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différents dosages en VEA pour le PC1+VEA14

L'effet des différentes combinaisons de SP/VEA sur la rétention des propriétés rhéologiques du MBE-BAP-B peut être représentée par la perte de maniabilité dans le temps (figure 5.7). Cette figure montre que pour tous les types de SP sans VEA, la perte de maniabilité dans le temps varie de l'un à l'autre, ce qui a été expliqué dans le chapitre précédent. Cependant, en augmentant le dosage en VEA, le dosage en SP augmente afin de garder la fluidité. Par conséquent, la perte de maniabilité dans le temps, qui est liée à l'augmentation du seuil, est améliorée par toutes les combinaisons de SP/VEA employées. Cette amélioration de la perte de maniabilité à dosage en VEA élevé est 50 % plus faible par rapport à la perte de maniabilité initiale, toutes les combinaisons de SP/VEA donnent une efficacité moyenne.

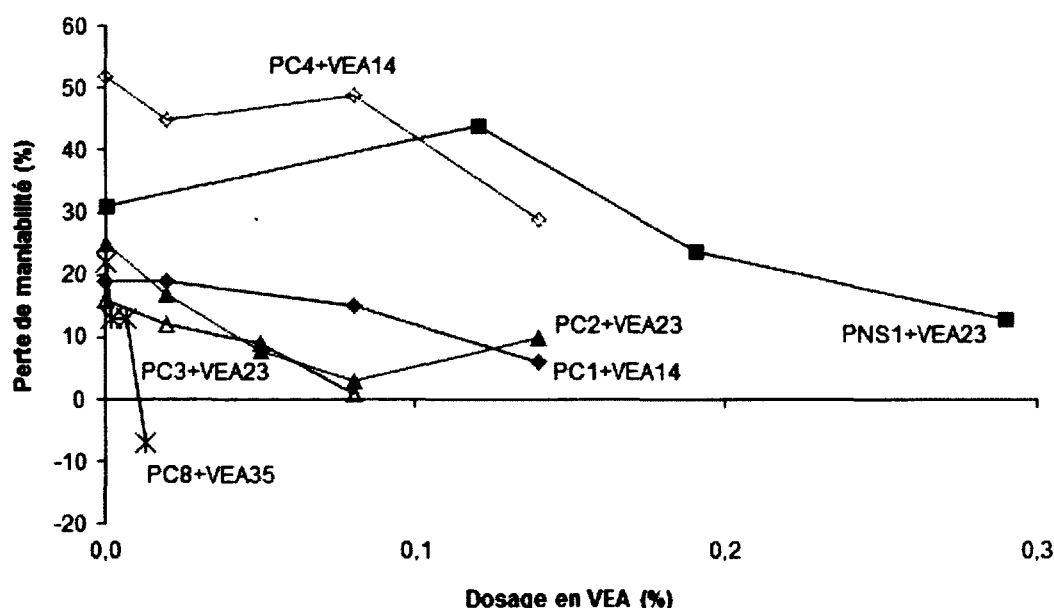


Figure 5.7 : Perte de maniabilité après 60 min pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.1.4 Ressuage forcé

L'essai de ressueage forcé est employé afin d'évaluer un indice de stabilité sous pression. Avec l'incorporation de VEA, pour avoir un niveau de fluidité donnée, (étalement = 260 ± 10 mm), la teneur en SP pour les MBE-BAP-B disperse suffisamment les grains de ciment, ce qui rend le mélange assez homogène (bonne compacité du système). Par conséquent, cette fluidité et cette compacité évitent de provoquer un « bouchon » au fond de la cellule de ressueage forcé (Yahia, 1997) ce qui réduit l'erreur sur l'indice de stabilité. Généralement, pour un ressueage forcé (RF %) plus faible, le mélange est plus stable. La variation du ressueage forcé pour les différentes combinaisons et les différents dosages en VEA est présentée dans la figure 5.8. Pour les combinaisons PC8+VEA35 et PNS1+VEA23, l'augmentation de la teneur en VEA résulte en une amélioration de la résistance au ressueage forcé (de 10 % à 3 % et de 7 % à 1 %, respectivement). En effet, puisque l'utilisation de VEA augmente la viscosité du système et améliore ainsi sa cohésion en évitant la séparation entre la phase liquide et solide, ce qui réduit le ressueage forcé. Par contre pour les autres PC/VEA, l'augmentation du dosage en VEA augmente la viscosité et améliore la stabilité, mais le ressueage forcé (± 10 %) ne varie pas. Dans ce cas, la stabilité n'est

pas liée directement à l'indice de ressuage forcé. L'essai du ressuage forcé ne peut pas être utilisé pour analyser la stabilité du MBE-BAP-B avec quelques combinaisons de SP/VEA

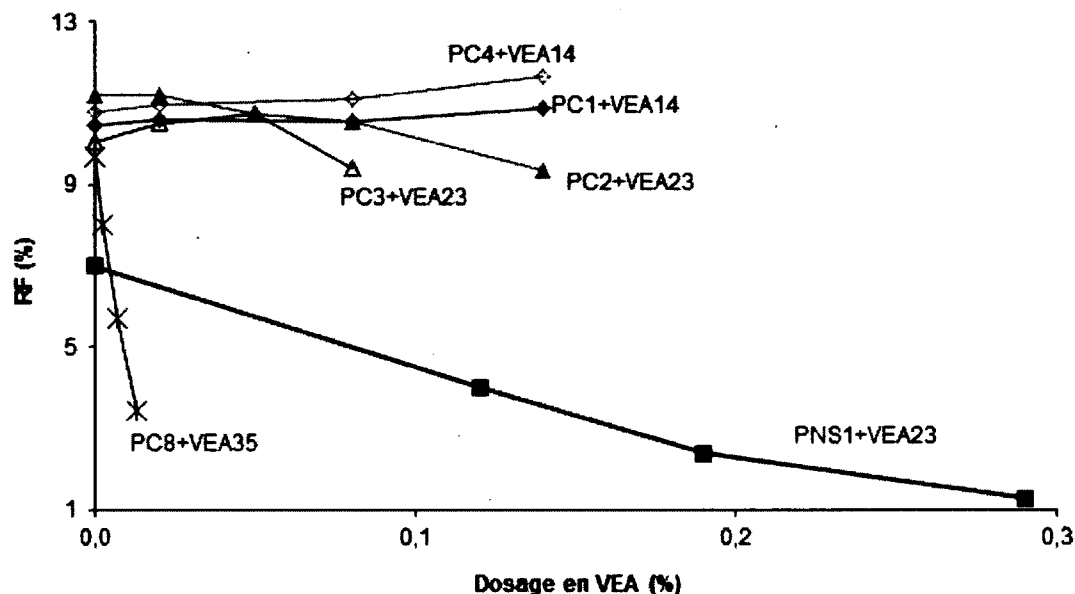


Figure 5.8 : Ressuage forcé pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.1.5 Propriétés mécaniques

La résistance à la compression du MBE-BAP-B est présentée dans les figures 5.9 et 5.10. Les résultats obtenus à 1 et 91 jours après le contact eau-ciment montrent que, la teneur en VEA n'influence que la résistance à jeune âge (1 jour). La résistance à long terme (91 jours) est similaire.

La résistance à la compression à jeune âge (1 jour) diminue dans le cas d'une augmentation de VEA, car sa demande en SP augmente en même temps afin de maintenir l'étalement et peut ainsi retarder la prise initiale. Cette diminution de la résistance dépend du type de combinaison de SP/VEA. Les MBE-BAP-B avec les combinaisons PC4+VEA14 et PC8+VEA35 assurent une bonne résistance à jeune âge (> 15 MPa). Ils peuvent réduire le délai de travail au chantier (efficacité élevée). Par contre, les autres combinaisons ont un impact

important sur la résistance à jeune âge pour un dosage en VEA élevé. Par exemple, la résistance à 1 jour peut varier entre 7 et 22 MPa pour les mortiers avec PC1+VEA14 et PC2+VEA23 (efficacité faible), alors que les mortiers avec PC3+VEA23 et PNS1+VEA23, les résistances à 1 jour varient respectivement de 12 à 17 MPa et de 8 à 14 MPa (efficacité moyenne).

En ce qui concerne la résistance à long terme, soit 7 jours après le contact eau-ciment, aucun effet de la combinaison de SP/VEA ni du dosage en VEA n'est observé. Les résistances à 91 jours sont de 75 MPa. L'écart de f_c entre les différentes combinaisons durant cette même période est inférieur à 15 %.

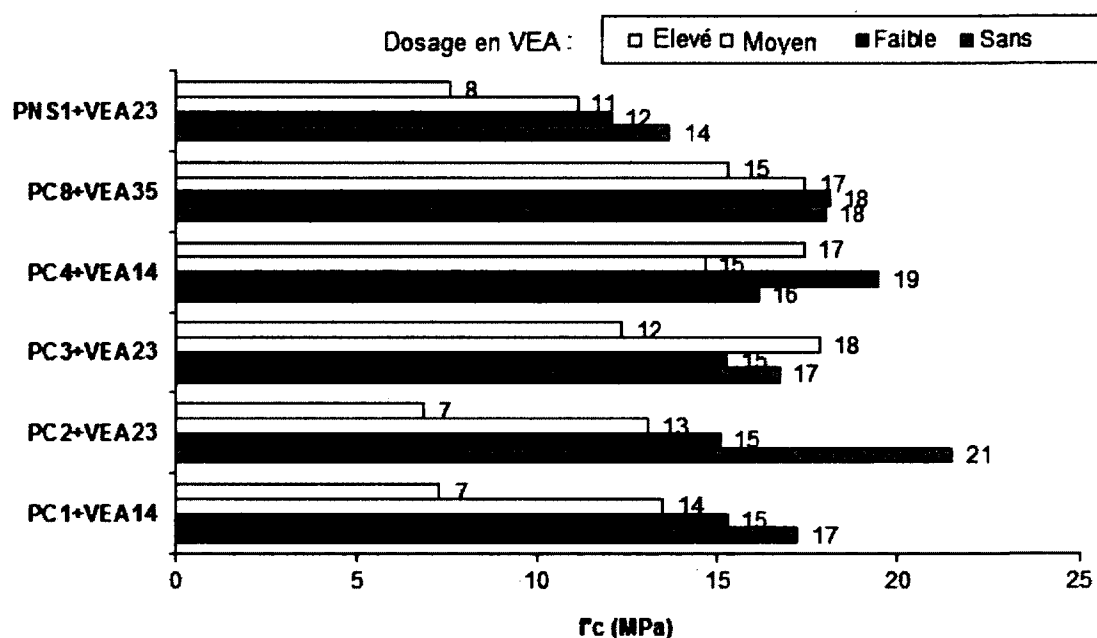


Figure 5.9 : Résistance à la compression à jeune âge (1 jour) pour le MBE correspondant au BAP-B bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA (teneur en air < 1 %)

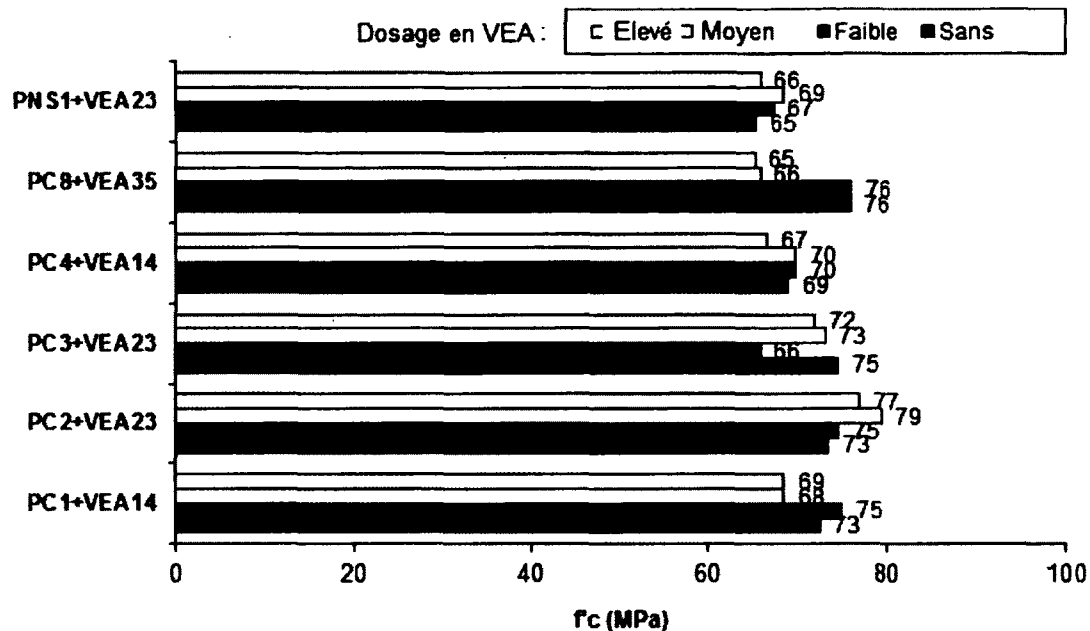


Figure 5.10 : Résistance à la compression à long terme (91 jour) pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA (teneur en air < 1 %)

5.2 Étude sur MBE de BAP pour la préfabrication (MBE-BAP-P)

Dans cette partie de l'étude, cinq combinaisons de SP/VEA avec quatre dosages en VEA fixe (sans, faible, moyen, élevé) ont été sélectionnées pour l'application dans le BAP pour la préfabrication (tableau 3.13).

5.2.1 Demande en superplastifiant (SP)

La demande en SP pour un étalement initial de 250 ± 10 mm est présentée dans la figure 5.11. Dans le cas d'un MBE sans VEA, la demande en SP pour les cinq types de PC est comprise entre 0,15 % et 0,2 %, ce phénomène peut être dû au mode de dispersion et à la structure des chaînes moléculaires, qui sont similaires pour les cinq PC. D'ailleurs, en augmentant le dosage en VEA, une augmentation similaire de la demande en SP est observée afin de maintenir le même étalement initial pour toutes les combinaisons PC/VEA. Cette augmentation des adjuvants $\Delta SP / \Delta VEA$ sont supérieurs à 100 % (efficacité moyenne).

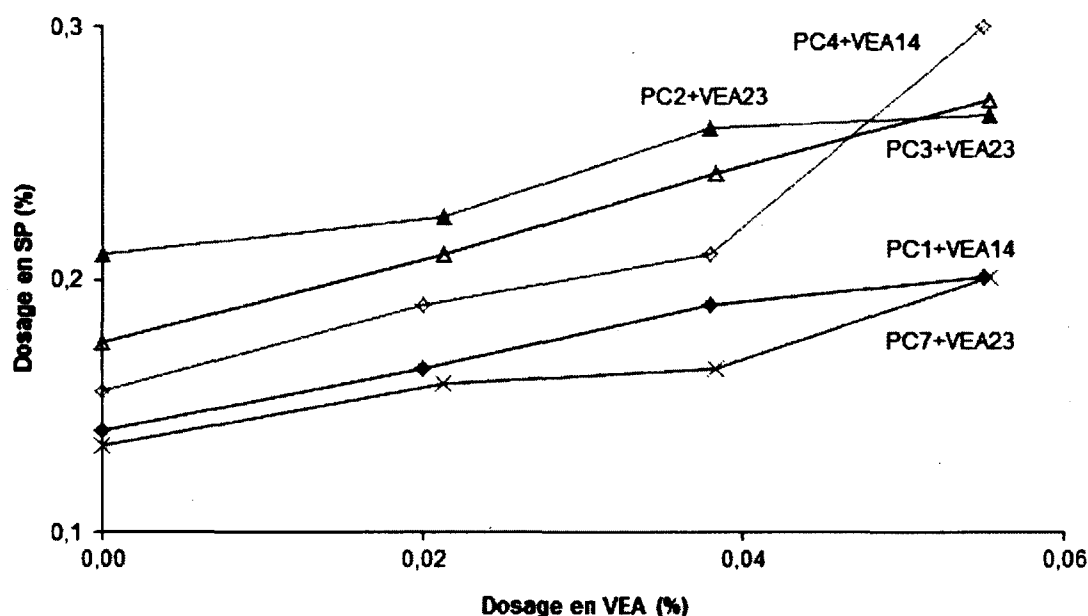


Figure 5.11 : Variation du dosage en SP en fonction du dosage en VEA pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.2.2 Propriétés rhéologiques initiales

La variation des propriétés rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité plastique) des MBE-BAP-P contenant différents dosages en VEA est présentée dans les figures 5.12 et 5.13, respectivement. Dans cette partie, toutes les combinaisons de SP/VEA donnent un seuil de cisaillement quasi identique (entre 10 - 30 Pa). Comme indiqué dans la discussion précédant de MBE-BAP-B, lorsque la teneur en adjuvant augmente, les combinaisons PC/VEA diminuent légèrement le seuil mais la fluidité du mélange ne varie pas significativement (efficacité faible). Dans le cas des MBE sans VEA, le seuil de cisaillement varie légèrement entre 10 et 30 Pa, cette différence diminue dans le cas d'un dosage en VEA élevé (entre 5 et 15 Pa). Cependant, il convient de noter que l'effet des différentes combinaisons de SP/VEA et de la teneur en VEA sur la rhéologie des mortiers influence de la viscosité. En augmentant le dosage en VEA, le dosage en SP augmente également, la viscosité du MBE-BAP-P avec tous les types de combinaison augmente légèrement. Cet effet de la teneur en VEA dépend du type de combinaison de SP/VEA employé. Par exemple pour la combinaison PC3+VEA23, en augmentant le dosage en VEA, la viscosité augmente de plus de 100 % par rapport à la viscosité initiale (efficacité élevée). L'effet des autres combinaisons n'ont pas significatif, était tous sont inférieurs à 15 % (efficacité faible).

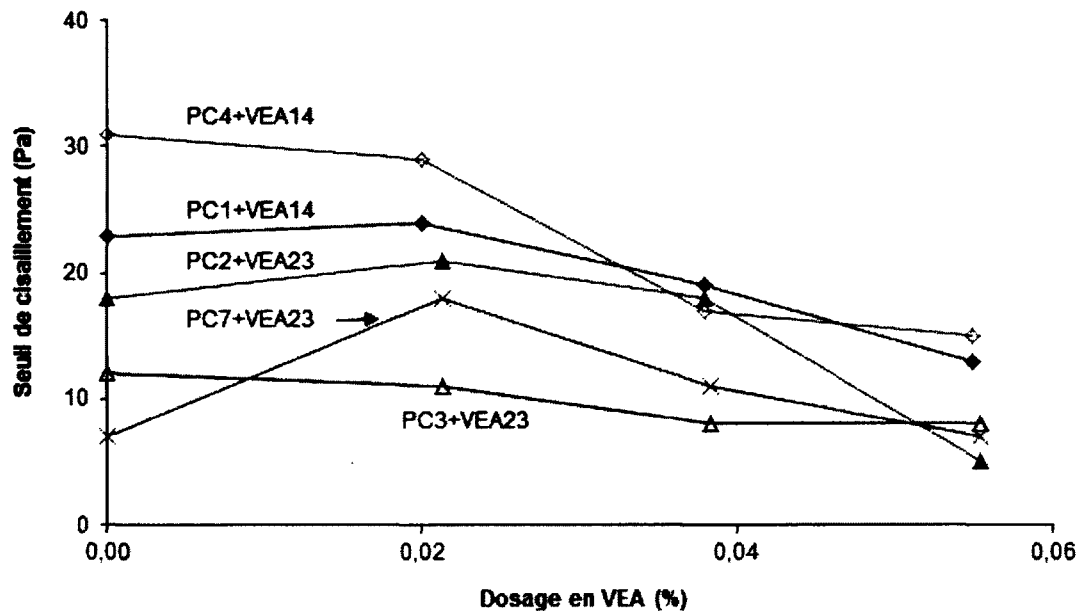


Figure 5.12 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du dosage en VEA pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différentes combinaisons de SP/VEA

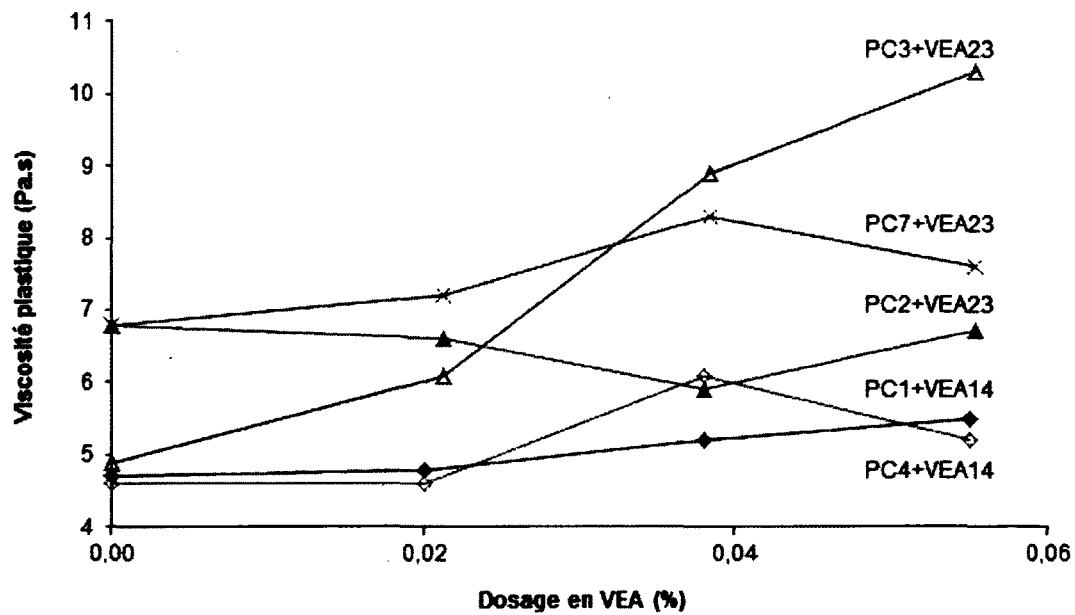


Figure 5.13 : Variation de la viscosité en fonction du dosage en VEA pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.2.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

La tendance de la rétention de maniabilité et des propriétés rhéologiques du MBE-BAP-P est similaire à celle du MBE-BAP-B, comme illustré dans les figures 5.14, 5.15 et 5.16 pour la combinaison PC1+VEA14. L'accroissement du dosage en VEA aide à améliorer l'étalement (figure 5.14) et le seuil de cisaillement (figure 5.15) dans le temps. Par contre, la viscosité augmente légèrement dans le temps, mais l'augmentation du VEA n'a aucun effet sur l'amélioration de la rétention de la viscosité (figure 5.16). Pour toutes les autres combinaisons de SP/VEA, l'effet de la teneur en VEA sur la rétention des propriétés rhéologiques est identique (Annexe A, figure A.2).

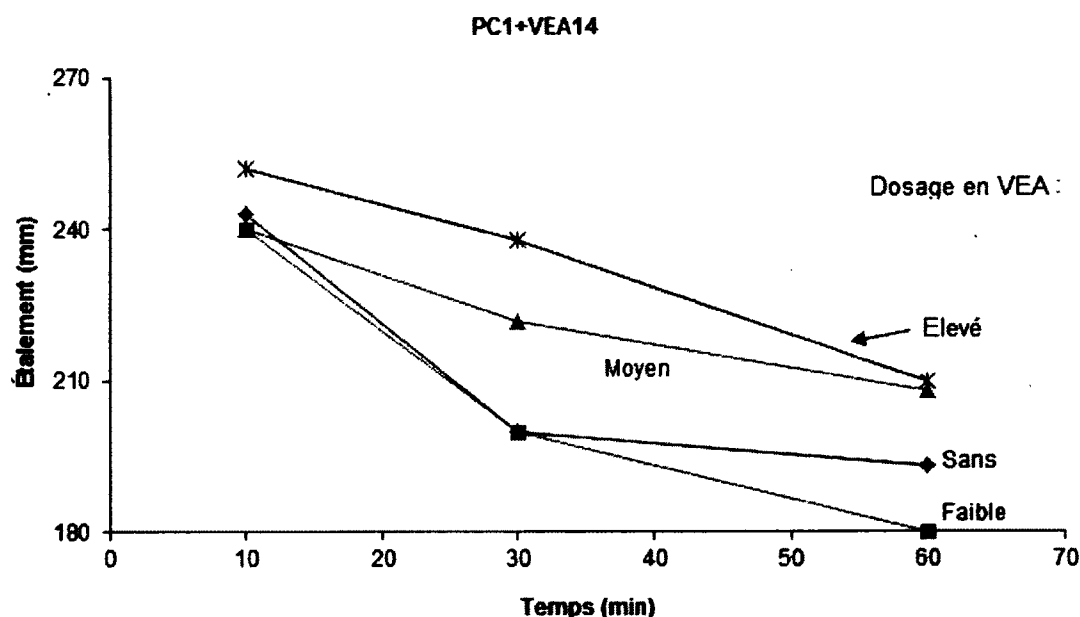


Figure 5.14 : Variation de l'étalement en fonction du temps pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents dosages en VEA pour le PC1+VEA14

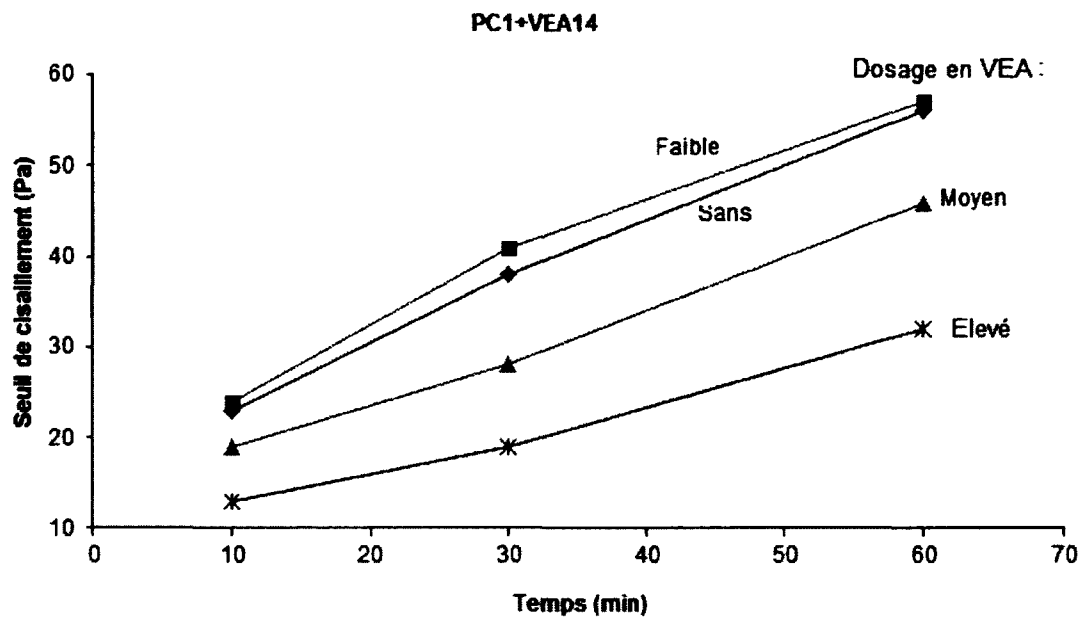


Figure 5.15 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du temps pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents dosages en VEA pour le PC1+VEA14

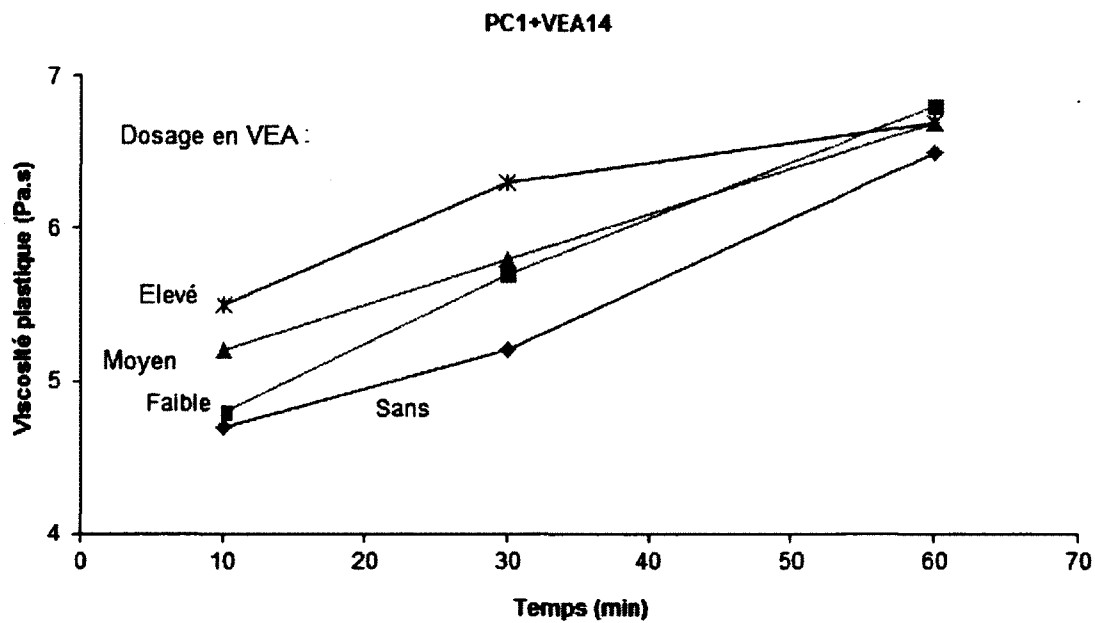


Figure 5.16 : Variation de la viscosité en fonction du temps pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différents dosages en VEA pour le PC1+VEA14

L'effet de différentes combinaisons sur la rétention des propriétés rhéologiques du MBE-BAP-P est représenté par la perte de maniabilité dans le temps (figure 5.17). Pour tous les types de combinaisons de SP/VEA, la rétention des propriétés rhéologiques est améliorée par l'augmentation du dosage d'adjuvant employé. La plupart des combinaisons PC/VEA peuvent diminuer cette perte de maniabilité de 5 à 10 % (efficacité moyenne). A part du mortier avec PC4+VEA14, à 60 min après le contact eau-ciment, même dosage en VEA (SP) élevé, l'étalement est toujours minimal ($\phi=100$ mm), car l'effet de SP/VEA sur la rétention dans le temps dépend fortement du type de combinaison de SP/VEA utilisé.

En outre, la combinaison de PC4+VEA14 provoque une faible rétention de l'étalement, du seuil et de la viscosité, comme dans le cas du MBE-BAP-P contenant simplement du SP. Il a été observé que le même dosage en VEA dans le mortier n'avait pas fait varier la tendance de la rétention. Cette dernière dépend uniquement du type de SP utilisé avec le VEA.

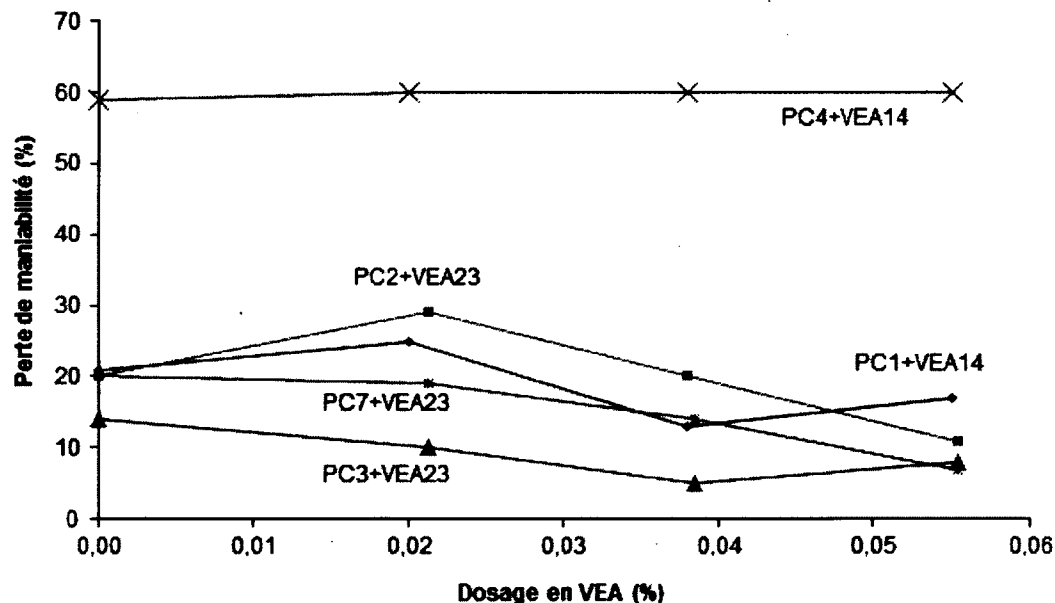


Figure 5.17 : Perte de maniabilité après 60 min pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.2.4 Ressuage forcé

Les résultats du ressuage forcé du MBE-BAP-P sur les différentes combinaisons et les différents dosages en VEA sont présentés dans la figure 5.18. Pour une maniabilité donnée (étalement = 250 ± 10 mm), en augmentant le dosage en VEA, le ressuage forcé (RF %) ne varie pas significativement (6 % - 9 %). La stabilité du MBE-BAP-P avec les combinaisons de PC/VEA n'est pas liée directement à l'indice de ressuage forcé. L'essai de ressuage forcé ne peut pas être utilisé pour analyser la stabilité du MBE-BAP-B.

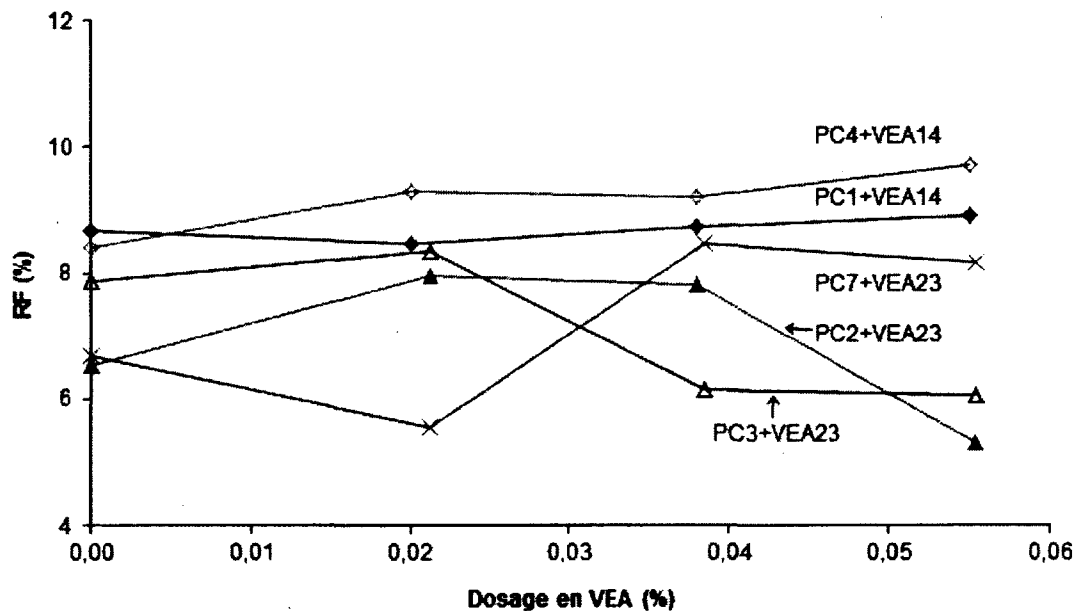


Figure 5.18 : Ressuage forcé pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.2.5 Propriétés mécaniques

La résistance à la compression des MBE-BAP-P, avec cinq combinaisons de SP/VEA pour quatre niveaux de teneur en VEA, est présentée dans la figure 5.19. En comparant avec le MBE-BAP-B, une faible diminution de la résistance à la compression à 1 jour est observée à dosage d'adjuvant élevé. Étant donné que le MBE-BAP-P contient plus de liant que le MBE-BAP-B, la sensibilité notable de la résistance à la compression à jeune âge aux variations des dosages d'adjuvant n'est pas significative. Par exemple, pour une plus grande variation PC2+VEA23, l'augmentation du dosage en adjuvant du mortier sans VEA à dosage en VEA

élevé cause une diminution de la f_c de 26 à 16 MPa (efficacité moyenne au niveau de la résistance). Cette diminution est encore plus faible pour les autres combinaisons. Le mortier avec les autres combinaisons d'adjuvant ont moins d'impact sur la diminution de la résistance à la compression à 1 jour (< 25 %, efficacité faible)

Pour ce qui est de la résistance à long terme (figure 5.20), soit 7 jours après le contact eau-ciment, aucun effet de la combinaison de SP/VEA ni du dosage en VEA n'est observé (peu d'effet du dosage en adjuvant sur la résistance). Les résistances à 7, 28 et 91 jours sont respectivement de 45, 65 et 80 MPa. L'écart de la f_c entre les différentes combinaisons pendant cette même période est inférieur à 15 %.

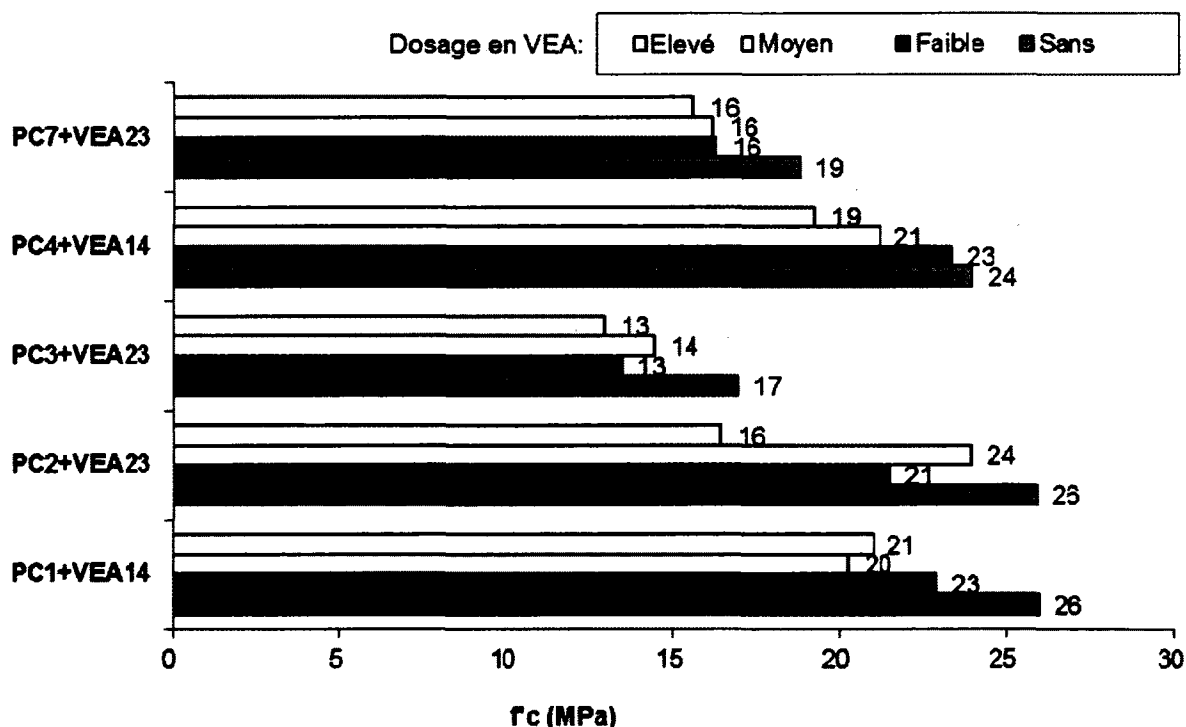


Figure 5.19 : Résistance à la compression à jeune âge (1 jour) pour le MBE correspondant au BAP pour préfabrication avec différentes combinaisons de SP/VEA (teneur en air < 1%)

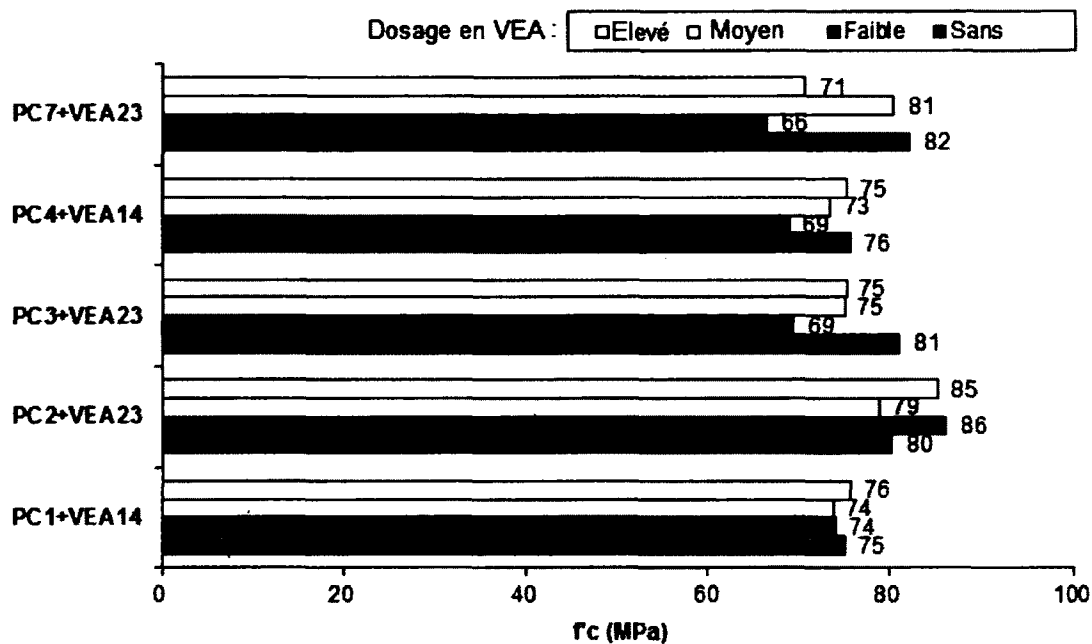


Figure 5.20 : Résistance à la compression à long terme (91 jours) pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication avec différentes combinaisons de SP/VEA (la teneur en air < 1%)

5.3 Étude sur le MBE du béton de masse avec une fluidité identique au BSAP (MBE-BSAP-BM)

5.3.1 Demande en superplastifiant (SP) et agent viscosité (VEA)

Le béton de masse avec une fluidité identique au BSAP (étalement initial = 500 ± 50 mm) exige une grande stabilité, à cause de ses gros granulats (40 mm) et de sa faible teneur en ciment LH (280 kg/m^3). Dans cette partie de l'étude, selon la référence du BSAP, l'indice de ségrégation (IS) > 96 % et le ressuage statique < 0,03 % sont testées à l'aide de la colonne de conductivité. Pour les combinaisons employées, le dosage en VEA varie afin de chercher la stabilité désirée. Par la suite, le dosage en SP est fixé pour un étalement initial identique. Tous les résultats du dosage en adjuvant sont présentés dans le tableau 5.1. Les IS et le ressuage statique de chaque combinaison sont présentés dans les figures 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 et 5.25.

Généralement, l'augmentation du dosage en VEA entraîne une augmentation du SI et une diminution du ressuage statique, et donc le mélange est plus stable : c'est le cas des mélanges contenant les combinaisons MR1+VEA23, MR2+VEA14, PNS1+VEA23 et PNS2+VEA23.

Mais dans certain cas, cette partie de SP supplémentaire peut diminuer la stabilité. Cette diminution compense l'effet de VEA qui augmente la stabilité du mélange. Finalement, la combinaison de SP/VEA n'améliore pas la stabilité : c'est le cas des combinaisons PC1+VEA14 et PC5+DG. En analysant la figure 5.21, la stabilité du PC1+VEA14 n'atteint jamais la limite du SI. Son ressuage s'accroît en augmentant le dosage en VEA, et donc cette combinaison ne peut pas être utilisée dans le MBE-BSAP-BM.

Le dosage en adjuvants de chaque combinaison de SP/VEA pour le MBE-BSAP-BM est présenté dans le tableau 5.2.

Tableau 5.1: Dosages en adjuvants de tous les mélanges MBE-BSAP-BM

	Combinaison	Dosage en SP	Dosage en VEA	SI	Étalement (mm)	Ressuage
Ref	Ref	0,10 %	0,01 %	96,0 %	210	0,00 %
PC1+VEA14	PC1+VEA14(1)	0,12 %	0,05 %	93,0 %	205	0,07 %
	PC1+VEA14(2)	0,15 %	0,10 %	93,8 %	200	0,05 %
	PC1+CEA14(3)	0,20 %	0,15 %	93,0 %	205	0,09 %
PC5+DG	PC5+DG(1)	0,13 %	0 %	95,5 %	220	0,03 %
	PC5+DG(2)	0,34 %	0,01 %	93,0 %	205	0,06 %
MR1+VEA23	MR1+VEA23(1)	0,12 %	0,03 %	94,5 %	212	0,03 %
	MR1+VEA23(2)	0,13 %	0,05 %	93,0 %	210	0,05 %
	MR1+VEA23(3)	0,23 %	0,11 %	97,0 %	210	0,01 %
	MR1+VEA23(4)	0,23 %	0,12 %	97,5 %	200	0,00 %
MR2+VEA14	MR2+VEA14(1)	0,17 %	0,05 %	93,3 %	205	0,08 %
	MR2+VEA14(2)	0,20 %	0,12 %	95,5 %	205	0,06 %
	MR2+VEA14(3)	0,21 %	0,13 %	97,7 %	207	0,03 %
PNS1+VEA23	PNS1+VEA23(1)	0,52 %	0,05 %	94,5 %	205	0,00 %
	PNS1+VEA23(2)	0,49 %	0,09 %	96,0 %	215	0,00 %
PNS2+VEA23	PNS2+VEA23(1)	0,54 %	0,09 %	96,5 %	210	0,00 %

Tableau 5.2: Dosages en adjuvants optimisés pour chaque combinaison employée dans les mélanges MBE-BSAP-BM

Combinaison	Dosage en SP (extra sec/masse de liant)	Dosage en SP (ml/100 kg de liant)	Dosage en VEA (extra sec/masse de liant)	Dosage en VEA (ml/100 kg de liant)
Ref	0,100 %	230	0,010 %	N/A
PC5	0,125 %	290	0,000 %	0
MR1+VEA23	0,251 %	1160	0,110 %	215
MR2+VEA14	0,210 %	870	0,130 %	240
PNS1+VEA23	0,489 %	995	0,085 %	165
PNS2+VEA23	0,535 %	1070	0,085 %	165

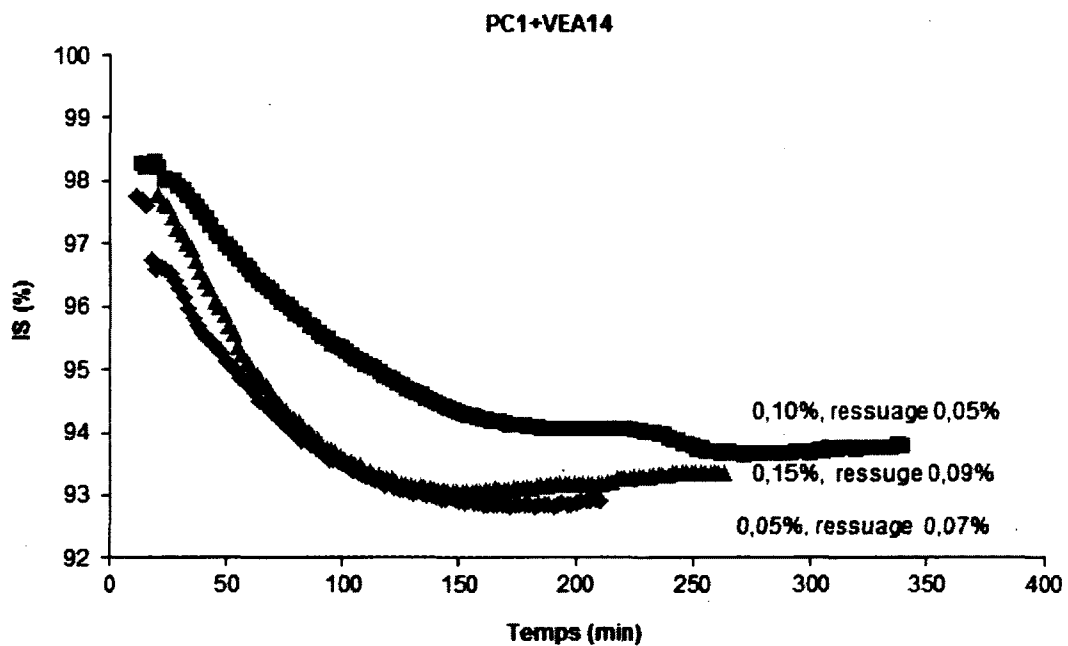


Figure 5.21 : Indice de ségrégation (IS %) en fonction du temps du MBE correspondant au BM à une fluidité identique au BSAP avec la combinaison PC1+VEA14 à différents dosage en VEA

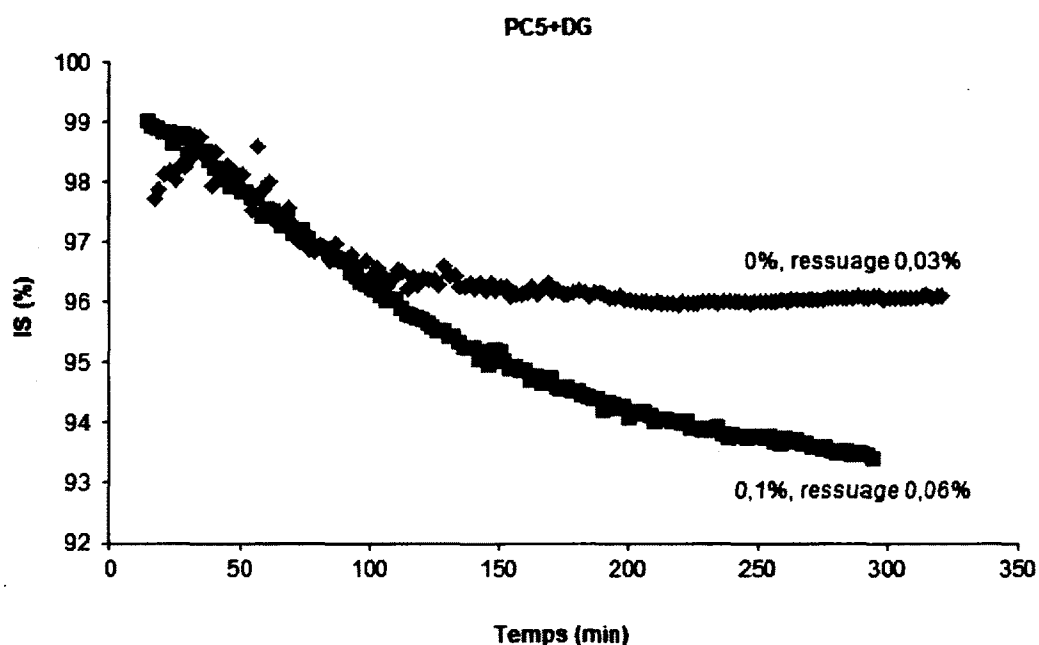


Figure 5.22 : Indice de ségrégation (IS %) en fonction du temps du MBE correspondant au BM à une fluidité identique au BSAP avec la combinaison PC5+DG à différents dosage en VEA

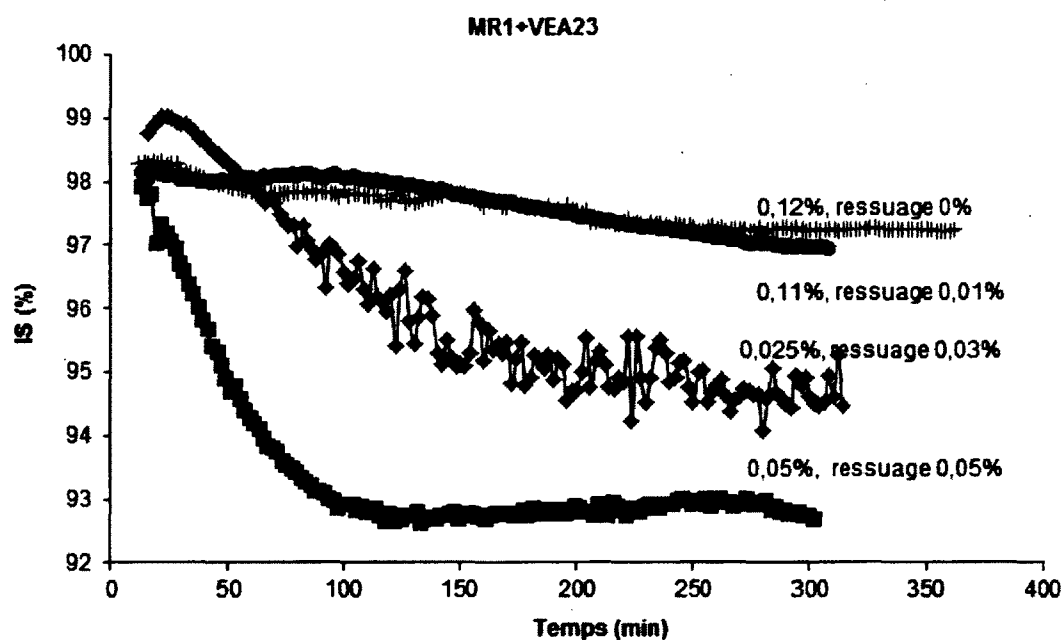


Figure 5.23 : Indice de ségrégation (IS %) en fonction du temps du MBE correspondant au BM à une fluidité identique au BSAP avec la combinaison MR1+VEA23 à différents dosage en VEA

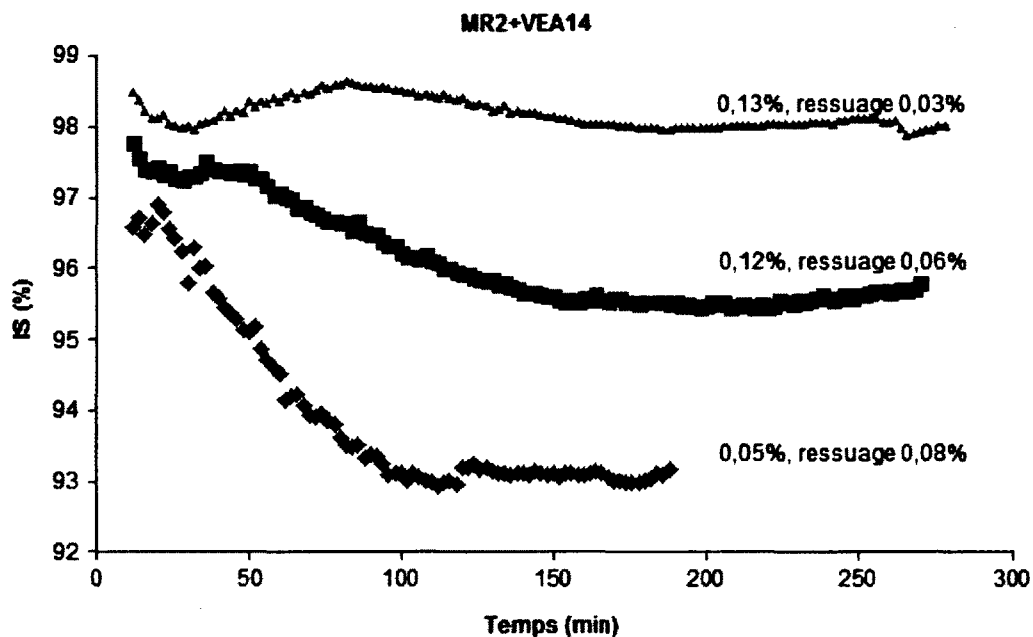


Figure 5.24 : Indice de ségrégation (IS %) en fonction du temps du MBE correspondant au BM à une fluidité identique au BSAP avec la combinaison MR2+VEA14 à différents dosage en VEA

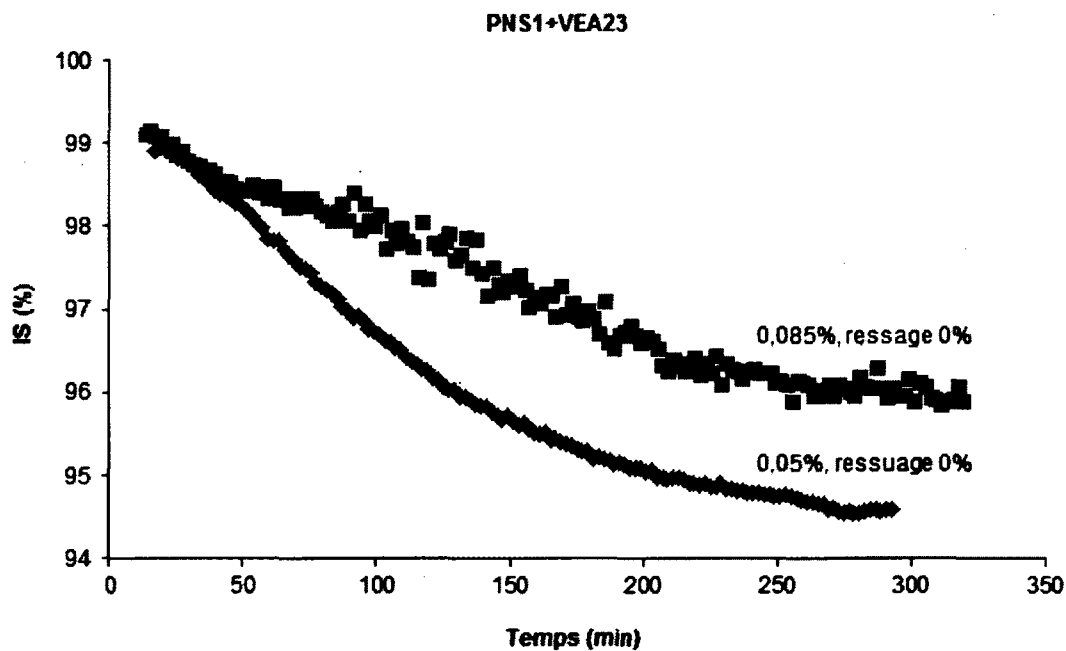


Figure 5.25 Indice de ségrégation (IS %) en fonction du temps du MBE correspondant au BM à une fluidité identique au BSAP avec la combinaison PNS1+VEA23 à différents dosage en VEA

5.3.2 Effet du SP/VEA sur la rétention de l'ouvrabilité dans le temps

a) Fluidité

Après l'optimisation des points (étalement initial = 210 ± 10 mm), la mesure de l'étalement et du temps d'écoulement sont répétés à 30 et 60 min après le contact eau-ciment. La figure 5.26 montre une perte de fluidité dans le temps pour le MBE-BSAP-BM. La perte d'étalement dans le temps dépend du type de combinaison utilisée. Les mélanges avec les combinaisons PC5, MR1+VEA23 et MR2+VEA14 donnent une bonne rétention de la fluidité. Leur diminution d'étalement est inférieure à 50 mm (efficacité élevée). De plus, les mélanges avec les combinaisons PNS1+VEA23 et PNS2+VEA23 donnent une diminution rapide de la fluidité, à 60 min, ceux-ci perdent 100mm d'étalement (efficacité faible). Ces différences entre les MBE-BSAP-BM pour les diverses combinaisons peuvent être expliquées par la capacité d'absorption, la compatibilité entre ciment/SP et l'interaction entre SP/VEA.

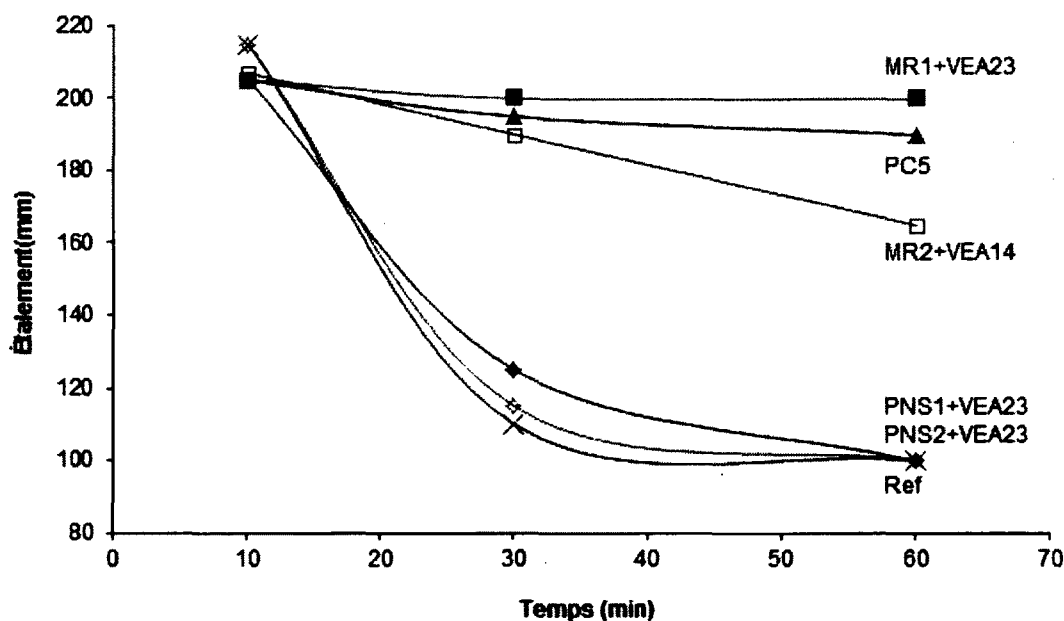


Figure 5.26 : Variation de l'étalement en fonction du temps pour le MBE correspondant au BM à une fluidité identique BSAP avec différentes combinaisons de SP/VEA

b) Rhéologie

L'influence de la combinaison de SP/VEA et du dosage en adjuvants sur la rhéologie, exprimée par le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, est présentée dans les figures 5.27 et 5.28. L'évolution des propriétés rhéologiques dans le temps est liée à la perte de fluidité, par conséquent, ce sont encore les mortiers avec les combinaisons PNS1+VEA23 et PNS2+VEA23 dont le seuil augmente le plus rapidement (plus de 80 Pa), ils perdent donc plus de rétention du seuil dans le temps (efficacité faible). Finalement, les mélanges avec les combinaisons MR1+VEA23, MR2+VEA14 et PC5 gardent bien la valeur du seuil dans le temps (Variation < 50 Pa, efficacité élevée).

Pour les mortiers avec un étalement initial identique, le seuil initial est presque le même. Par ailleurs, la viscosité initiale du MBE-BSAP-BM peut avoir de grandes différences, dépendant du type de combinaison de SP/VEA employée. La viscosité du mortier augmente dans le temps. Ce taux d'augmentation de la viscosité pour le PNS/VEA est beaucoup plus grand que les autres (de 5 à 9 Pa.s), ils ont donc une plus grande perte de rétention de la viscosité dans le temps (efficacité faible), alors les mortiers avec MR/VEA ou PC5 montrent peu de changements de la viscosité dans le temps (efficacité élevée).

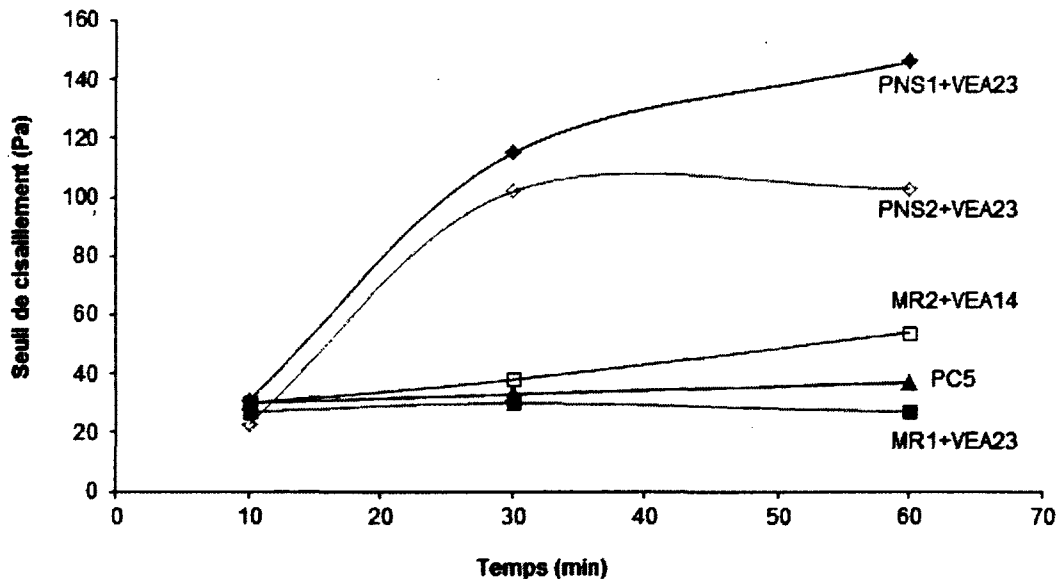


Figure 5.27 : Variation du seuil en fonction du temps pour le MBE correspondant au BM à une fluidité identique au BSAP avec différentes combinaisons de SP/VEA

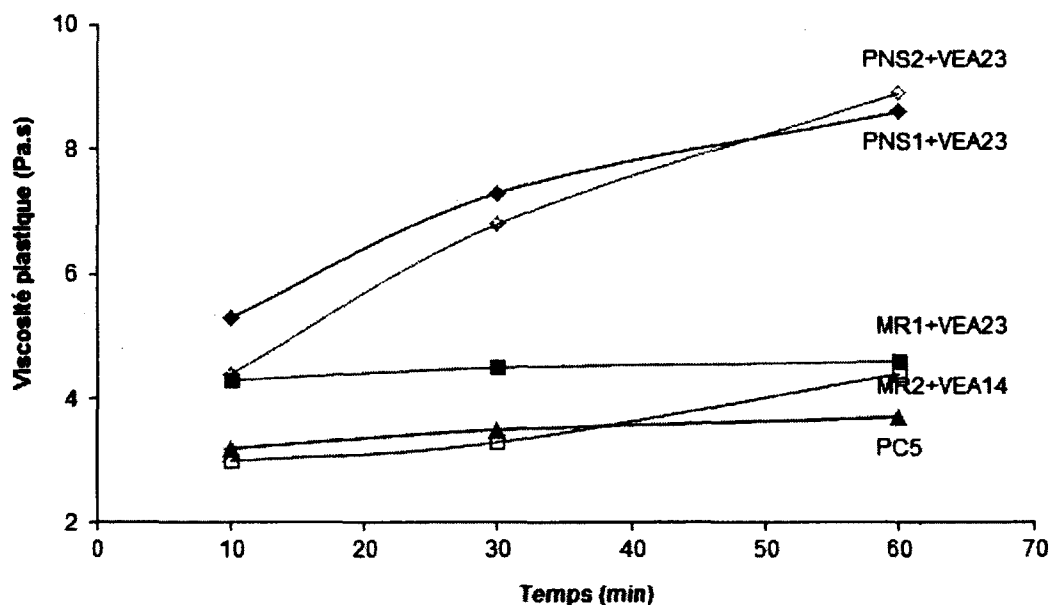


Figure 5.28 : Variation de la viscosité en fonction du temps pour le MBE correspondant au BM à une fluidité identique BSAP avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.3.3 Effet du SP/VEA sur le dégagement de chaleur

La température initiale du MBE-BSAP-BM est d'environ 10° C. L'influence des différentes combinaisons de SP/VEA sur l'augmentation de température du MBE est présentée dans la figure 5.29. Un dégagement de chaleur est observé à l'aide du calorimètre adiabatique jusqu'à 48h après le contact eau-ciment. L'effet des combinaisons de SP/VEA sur la variation de la température initiale à 24 h ou à 48 h dépend du type de combinaison employée. Les mortiers avec MR/VEA donnent des dégagements de chaleur plus lents que les autres. Après 24 h, leur température est d'environ 9° C et après 48 h, leur température est 14° C (efficacité élevée). Pour les combinaisons PNS/VEA et PC5, leur température à 24 h et à 48 h peuvent atteindre respectivement vers 11° C et 15° C (efficacité moyenne).

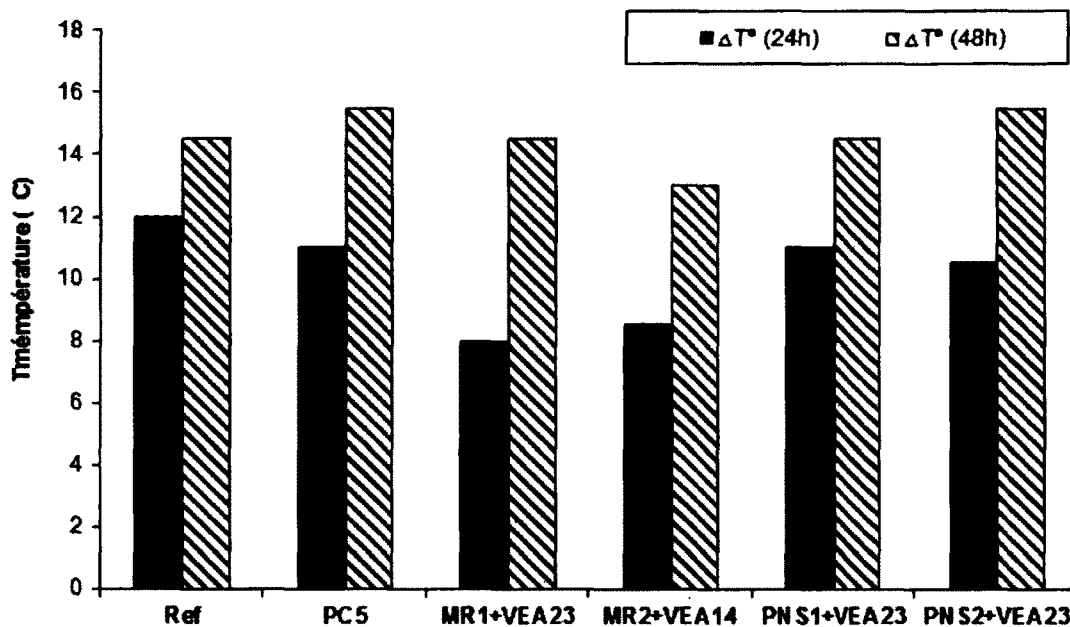


Figure 5.29 : Dégagement de la chaleur jusqu'à 24 h et 48 h pour le MBE correspondant au BM à une fluidité identique BSAP avec différentes combinaisons de SP/VEA

5.3.4 Effet du SP/VEA sur la résistance à la compression

La résistance à la compression à 1, 7, 28 et 91 jours est présentée dans la figure 5.30. La température de mûrissement est identique pour tous les échantillons. Par conséquent, la température a peu d'effet sur la résistance à jeune âge même si les dégagements de chaleur du MBE-BSAP-BM sont différents. La variation de la f_c à 1 jour (de 3 à 7 MPa) dépend simplement du type de combinaison, car les différents SP/VEA créent divers modes de dispersions du ciment et diverses rétentions de la fluidité. Par exemple, la résistance à 1 jour du mortier avec MR1+VEA23 est de 3 MPa, indiquant un effet important de l'adjuvant sur la résistance (efficacité élevée). Ainsi les autres combinaisons donnent une résistance presque identique (5-7 MPa, efficacité faible). En outre, la combinaison de SP/VEA n'a aucun effet sur la résistance à long terme dans les mêmes conditions de mûrissement et pour la même composition de MBE employée. La résistance augmente respectivement à 20, 35 et 50 MPa pour 7, 28 et 91 jours.

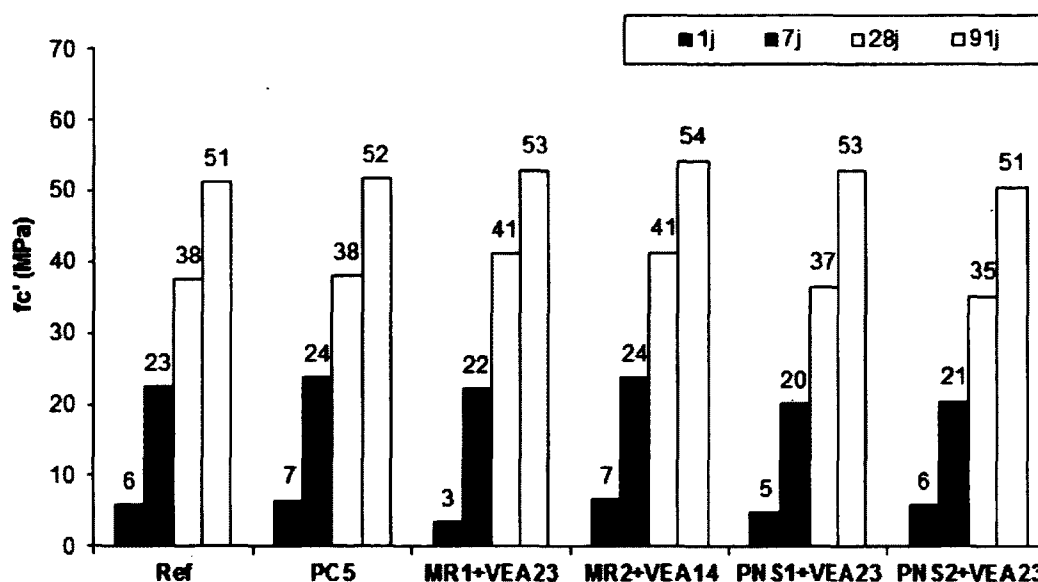


Figure 5.30 : Résistance à la compression à 1, 7, 28 et 91 jours pour le MBE correspondant au BM à une fluidité identique BSAP avec différentes combinaisons de SP/VEA (teneur en air < 1 %)

5.4 Discussions

Cette section a présenté des comparaisons et des discussions de l'effet des combinaisons de SP/VEA sur les propriétés de trois types de MBE à rhéologie adaptée (MBE-BAP-B, MBE-BAP-P et MBE-BSAP-BM). Le rapport E/L, la teneur en liant et la teneur en sable sont différents pour ces trois types de composition de MBE, tel que présenté dans le tableau 3.10.

5.4.1 Demande en superplastifiant

Pour les MBE-BAP-B et MBE-BAP-P, et afin d'analyser l'effet de la combinaison de SP/VEA, on remarque que le dosage en VEA augmente avec la demande en SP pour maintenir le même étalement initial. L'augmentation du dosage en SP par rapport celle du dosage en VEA ($\Delta SP / \Delta VEA$) des combinaisons PC/VEA est supérieure de 100 %, ce qui est plus élevé que celles des combinaisons PNS/VEA (10 %). Cette différence est due à la composition du VEA disponible sur le marché. Dans les VEA employés, l'extrait sec de VEA, dont le Welan Gum, est dilué dans le PNS. En effet, les VEA contiennent beaucoup de PNS, et ne présentent aucun problème de compatibilité au niveau de la combinaison PNS/VEA. Par contre, l'incompatibilité

existe pour la combinaison PC/VEA. Entre le PNS, le PC et le Welan Gum, la quantité de PNS contenue dans le VEA influence l'effet du PC.

Pour ce qui est des MBE-BSAP-BM, un dosage minimal de SP et de VEA a été choisi pour son étalement initial et sa stabilité. La combinaison PC1+VEA14 ne peut jamais produire un mélange stable, c'est une combinaison d'adjuvants chimique recommandée pour le BAP, elle ne peut pas s'appliquer dans le cas des BSAP-BM. Les autres combinaisons (MR1+VEA23, MR2+VEA14, PNS1+VEA23 et PNS2+VEA23) sont plus approprié quand le BM est très fluide, et donc aussi pour le BSAP-BM. Cependant, ces combinaisons exigent une grande quantité de VEA (> 150 ml/100 kg de liant) et ainsi une grande quantité de SP afin d'obtenir une bonne stabilité et fluidité. Le PC5 est un seul type de SP employé qui satisfait aux conditions requises sans VEA.

5.4.2 Propriétés rhéologiques initiales

Dans le MBE-BAP-B et le MBE-BAP-P, toutes les combinaisons de SP/VEA avec ces différents dosages en VEA donnent un seuil de cisaillement presque identique (10 - 30 Pa) lorsque l'étalement est constant. Il convient de noter que la viscosité plastique initiale augmente avec l'accroissement du dosage en VEA. Toutes les combinaisons de SP/VEA employées sont bien choisies pour les applications requises. L'augmentation du dosage en VEA améliore facilement la stabilité du mélange.

5.4.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

Dans le MBE-BAP-B et le MBE-BAP-P, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent dans le temps. Ce phénomène (perte des propriétés rhéologiques) s'améliore en augmentant le dosage en VEA et ainsi le dosage en SP. Dans ces deux types de mélanges, c'est toujours la combinaison PC4+VEA14 qui provoque une faible rétention de l'étalement, du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. Le même résultat a aussi été observé pour le mélange contenant simplement du SP. Le PC4 peut être considéré dans le cas de préfabrication qui n'exige pas une bonne rétention. Les autres combinaisons employées peuvent s'appliquer dans les deux systèmes, c'est à dire sur chantier ou en préfabrication. Il est observé que le dosage en VEA dans le mortier n'influence que le taux d'amélioration de la rétention. Pour le même dosage en VEA, la valeur de la perte de rétention dépend uniquement du type de SP utilisé.

Dans le MBE-BSAP-BM, les combinaisons PNS1+VEA23 et PNS2+VEA23 perdent rapidement leur rétention dans le temps. Par contre, les combinaisons MR1+VEA23 et MR2+VEA14 maintiennent parfaitement leur rétention. Le MR1 et le MR2 sont le type particulier de SP employé dans le BSAP-BM. En outre, comme mentionné dans le chapitre avant sur le MBE-BAP-B, le PC5 utilisé seul dans ce type de mélange aide à maintenir une bonne rétention. Il en résulte que la rétention des propriétés rhéologiques dans le temps dépend principalement du type de SP utilisé.

5.4.4 Ressuage forcé

Dans le MBE-BAP-B et MBE-BAP-P, en comparant les figures 5.8 et 5.18, l'indice de ressuage forcé (RF %) varie par rapport au mélange avec PNS1+VEA23 ou avec PC8+VEA35. Les autres PC/VEA employés n'ont pas d'effet sur le RF %, donc la stabilité n'est pas liée directement à l'indice de ressuage forcé. L'essai du ressuage forcé ne peut pas être utilisé pour analyser la stabilité des mélanges incorporant des combinaisons de SP/VEA

5.4.5 Propriétés mécaniques

Dans les deux systèmes, MBE-BAP-B et MBE-BAP-P, la résistance à la compression à jeune âge (1 jour) diminue dans le cas d'une augmentation du VEA (figure 5.9 et 5.19). Cette diminution est beaucoup plus forte dans le MBE-BAP-B qu'elle ne l'est dans le MBE-BAP-P à cause de la différente teneur en liant, ce qui répond bien aux applications de ces deux types de mélange. La diminution de la résistance dépend ainsi du type de combinaison de SP/VEA. Par exemple, l'augmentation du dosage en VEA et en SP dans la combinaison PC2+VEA23 réduit la f_c à 1 jour plus que les autres combinaisons. Cette différence peut être due à la concurrence entre l'absorption du SP et du VEA sur les grains de ciment [Bédard et Mailvaganam, 2006]. En effet, ce dosage élevé entraîne un retard de prise du béton, ce qui ralentit les autres étapes de la construction sur chantier (l'élément en béton doit atteindre une résistance minimale avant d'être sollicité). Jusqu'à long terme, la résistance à la compression est similaire pour le MBE-BAP-B et pour le MBE-BAP-P, l'effet du SP/VEA étant négligeable.

5.5 Conclusion

L'influence des combinaisons de SP/VEA est évaluée dans les trois types de MBE (MBE-BAP-B, MBE-BAP-P et MBE-BSAP-BM). Les tableaux 5.3, 5.4 et 5.5 résument le comportement de la fluidité, des propriétés rhéologiques, du dégagement de chaleur, de la résistance à la compression et des variations dans le temps de ces trois types de MBE.

➤ Tous les VEA augmentent la viscosité plastique de MBE; cet effet dépend de la combinaison de SP/VEA. La plus grande augmentation de la viscosité est associée aux combinaisons PNS1/VEA23 (170 % par rapport à SP initial) et PC1/VEA14 (50 %) pour MBE-BAP-B et PC3/VEA23 (100 %) pour MBE-BAP-P.

➤ L'incorporation de VEA augmente la demande en SP de 10 % à 25 % selon le dosage en VEA et la combinaison de SP/VEA.

➤ L'augmentation du dosage en VEA (et en SP) donne généralement une meilleure rétention de la maniabilité.

➤ L'utilisation de VEA ne diminue pas le ressuage forcé, sauf pour les combinaisons PNS1/VEA23 et PC8+VEA35.

➤ L'incorporation de VEA (et de SP) affecte la résistance à jeune âge, selon le dosage en VEA et la combinaison de SP/VEA

MBE-BAP-B : de 0 % (PC4/VEA14) à 66 % (PC2/VEA23)

MBE-BAP-P : de 15 % (PC7/VEA23) à 40 % (PC2/VEA23)

➤ L'incorporation de VEA (et de SP) a peu d'effet sur les $f'c$ à 28 et 91 jours (< 10 % par rapport au MBE sans VEA).

Tableau 5.3 : Effets du dosage en VEA sur les propriétés du MBE-BAP-B

MBE-BAP-B	PC1+ VEA14	PC2+ VEA23	PC3+ VEA23	PC4+ VEA14	PNS1+ VEA23	PC8+ VEA35
Demande en SP	II	II	II	II	I	II
Variation du seuil de cisaillement	III	III	III	III	III	III
Augmentation de la viscosité plastique	II	II	II	II	I	II
Amélioration de la perte de fluidité dans le temps	II	II	II	II	II	II
Amélioration de la rétention du seuil dans le temps	II	II	II	II	II	II
Amélioration de la rétention du viscosité dans le temps	III	III	III	III	III	III
Résistance à la compression à jeune âge	I	I	II	III	II	III
Résistance à la compression à long terme	-	-	-	-	-	-

Tableau 5.4 : Effets du dosage en VEA sur les propriétés du MBE-BAP-P

MBE-BAP-P	PC1+ VEA14	PC2+ VEA23	PC3+ VEA23	PC4+ VEA14	PC7+ VEA23
Demande en SP	II	II	II	II	II
Variation du seuil de cisaillement	III	III	III	III	III
Augmentation de la viscosité plastique	-	-	I	-	III
Amélioration de la rétention de fluidité dans le temps	II	II	II	-	II
Amélioration de la rétention du seuil dans le temps	-	-	-	I	-
Amélioration de la rétention de la viscosité dans le temps	-	-	-	-	-
Ressuage forcé	-	-	-	-	-
Résistance à la compression à jeune âge	III	II	III	III	III
Résistance à la compression à long terme	-	-	-	-	-

Tableau 5.5 : Effets de la combinaison de SP/VEA sur les propriétés du MBE-BMF

MBE-BSAP-BM	MR1+ VEA23	MR2+ VEA14	PC5	PNS1+ VEA23	PNS2+ VEA23
Amélioration de la perte de fluidité dans le temps	I	I	I	III	III
Amélioration de la rétention du seuil dans le temps	I	I	I	III	III
Amélioration de la rétention de la viscosité dans le temps	I	I	I	III	III
Dégagement de chaleur	I	I	II	II	II
Résistance à la compression à jeune âge	I	III	III	III	III
Résistance à la compression à long temps	-	-	-	-	-

I : Efficacité élevée

II : Efficacité moyenne

III : Efficacité faible

- : Peu d'effet

CHAPITRE 6

Effet de la combinaison superplastifiant/agent entraîneur d'air sur les propriétés des mortiers de béton équivalents

L'emploi d'air entraîné est recommandé pour presque tous les bétons, principalement pour améliorer leur résistance au gel quand ils sont exposés à l'eau et aux produits de déglacage. Ce chapitre étudie de l'effet des différentes combinaisons entre superplastifiant (SP) et agents entraîneur d'air (AEA) sur la performance du MBE-BSAP et de MBE-BMF. Après l'optimisation du mortier de béton équivalent (MBE) sans AEA avec un étalement initial donné, le dosage fixe en SP est obtenu. Par la suite, l'AEA est ajouté à divers dosages afin d'étudier l'influence de la teneur en air sur les propriétés rhéologiques, la rétention et les propriétés mécaniques.

6.1 Étude sur le MBE de béton semi-autoplaçant (MBE-BSAP)

Dans cette partie d'étude, la performance et la compatibilité des trois combinaisons de SP/AEA ont été évaluées (tableau 3.15) avec quatre dosages en AEA (sans, faible, moyen, élevé), désignées pour l'application de MBE dans le béton semi-autoplaçant pour l'infrastructure (étalement initial = 210 mm).

6.1.1 Teneur en air

La teneur en air du MBE avec le dosage SP fixé est présentée sur la figure 6.1. La teneur en air des MBE sans AEA est similaire (± 2 %). L'ajout d'AEA dans le mélange augmente la teneur en air de tous les MBE jusqu'au point de saturation. Cet accroissement de la teneur en air dépend du type de combinaison de SP/AEA employé dans le mélange. La combinaison PC1+AEA14 atteint facilement 16 % d'air dans le MBE (efficacité élevée sur l'air entraîné). Son accroissement est linéaire. La combinaison MR1+AEA23 provoque une augmentation rapide de l'air (jusqu'à 8 % pour un dosage en AEA faible), ensuite la teneur en air augmente lentement (de 8 à 12 %, efficacité moyenne). L'augmentation de la teneur en air pour la combinaison PNS1+AEA23 est encore plus lente (efficacité faible) avec un point de saturation en air plus faible (10 %).

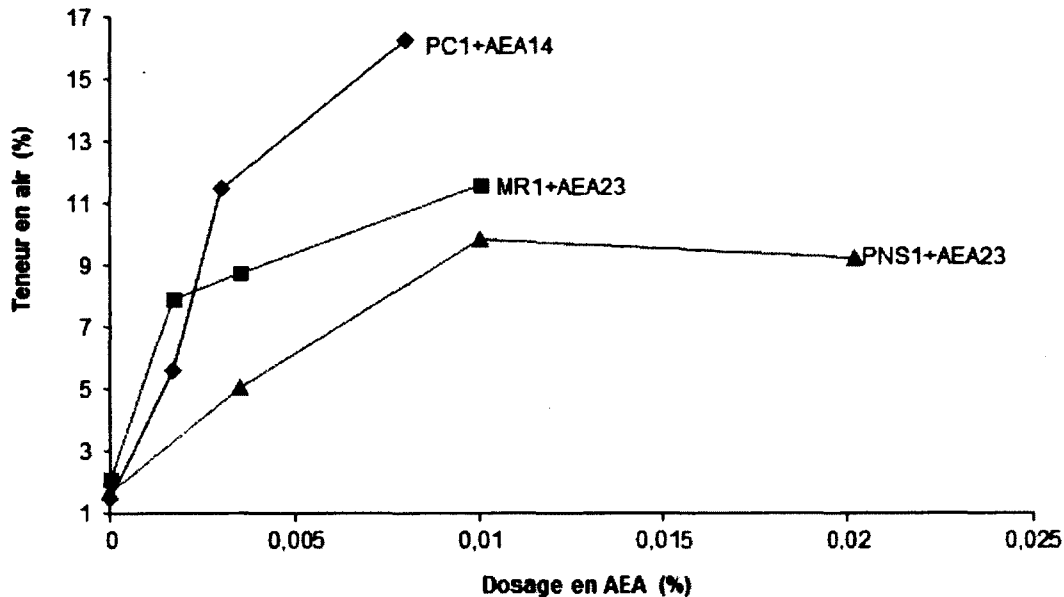


Figure 6.1 : Variation de la teneur en air en fonction du dosage en AEA pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différentes combinaisons de SP/AEA

6.1.2 Propriétés rhéologiques initiales

L'effet de la teneur en air sur la maniabilité du MBE-BSAP est présenté SUR la figure 6.2. Quand le dosage en AEA augmente et que le dosage en SP reste constant, une diminution de la maniabilité du MBE-BSAP apparaît (de 210 à 150 mm). En effet, une faible teneur en air (< 5 %) donne une diminution moins importante de la maniabilité. Plus la teneur en air augmente, plus l'étalement de MBE-BSAP diminue. Finalement, l'étalement reste constant jusqu'à saturation de la teneur en air, même si l'AEA augmente dans le mélange. En outre, cet effet de la teneur en air sur la diminution de la maniabilité dépend du type de combinaison de SP/AEA employé dans le mélange. Pour la combinaison PNS1+AEA23, sa maniabilité commence à diminuer à faible teneur en air (5 %), et l'étalement peut être abaissé jusqu'à 150 mm à 10 % de la teneur en air (efficacité élevée sur la diminution de la maniabilité). Par contre, les combinaisons MR1+AEA23 et PC1+AEA14 commencent à perdre leur maniabilité au teneur en air élevé. La MR1+AEA23 diminue l'étalement après 8 % de teneur en air (efficacité moyenne), et la combinaison PC1+AEA14 réduit la maniabilité après 12 % de teneur en air (efficacité faible).

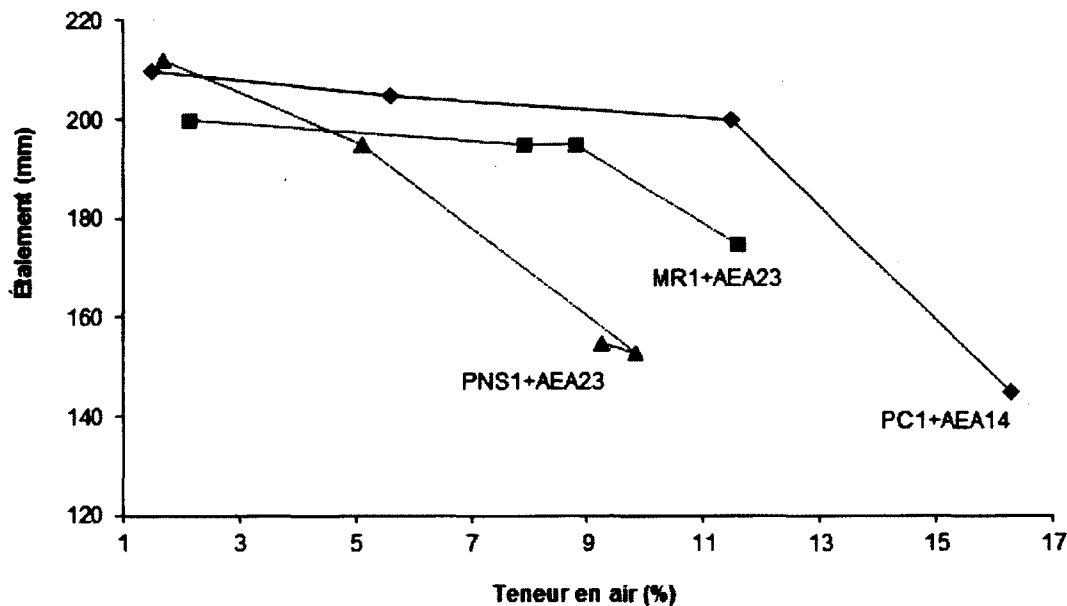


Figure 6.2 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différentes combinaisons de SP/AEA

En augmentant la teneur en air, le seuil de cisaillement du MBE-BSAP accroît, tel que présenté dans la figure 6.3. Tous les AEA permettent d'augmenter le seuil du mortier jusqu'au point de saturation de la teneur en air. Cette augmentation du seuil dépend aussi du type de combinaison de SP/AEA employé dans le mortier. La combinaison PNS1+AEA23 augmente le seuil plus rapidement que les autres combinaisons. En augmentant la teneur en air de 2 % à 10 %, son seuil de cisaillement peut augmenter de 20 à 70 Pa (efficacité élevée sur le taux d'accroissement du seuil), et cet accroissement est linéaire. La combinaison MR1+AEA23 maintient bien leur seuil quand jusqu'au 9% de la teneur en air, après 9 % le seuil commence à augmenter (efficacité moyenne). Finalement, c'est la combinaison PC1+AEA14 qui commence l'augmentation du seuil le plus tard (efficacité faible), mais cette combinaison peut entraîner plus d'air, cette grande quantité d'air dans le MBE provoque un grand seuil.

L'effet de la teneur en air sur la variation de la viscosité est faible et variable (figure 6.4). En augmentant la teneur en air, la viscosité du MBE-BSAP avec MR1+AEA23 et PC1+AEA14 varie légèrement. Cette variation est inférieure à 10 % (efficacité faible sur la variation de la viscosité). Par contre la variation de la viscosité avec PNS1+AEA23 augmente un peu plus que les autres (efficacité moyenne).

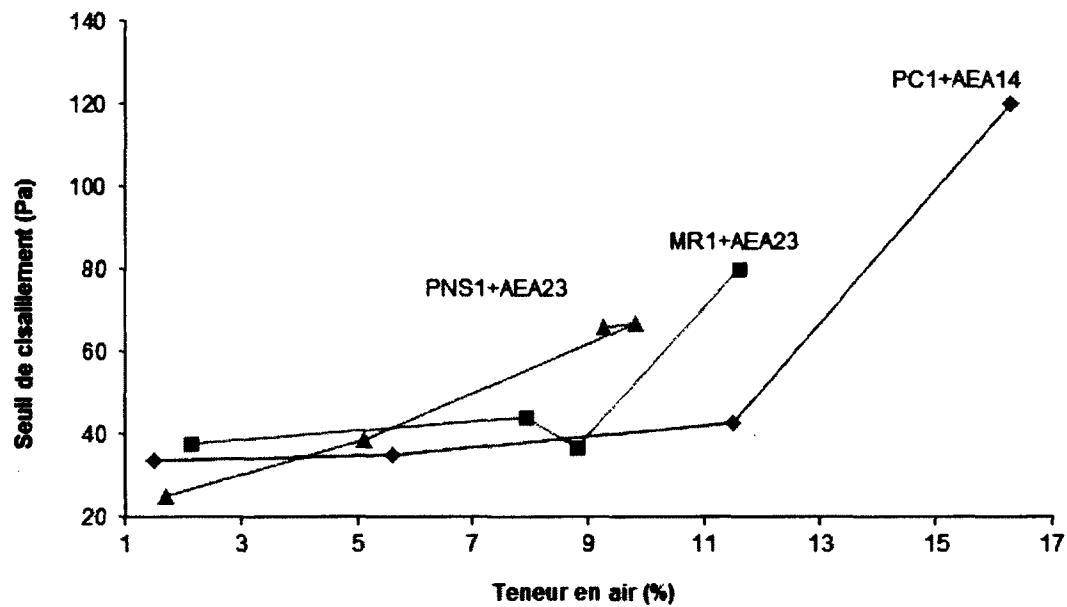


Figure 6.3 : Variation du seuil en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différentes combinaisons de SP/AEA

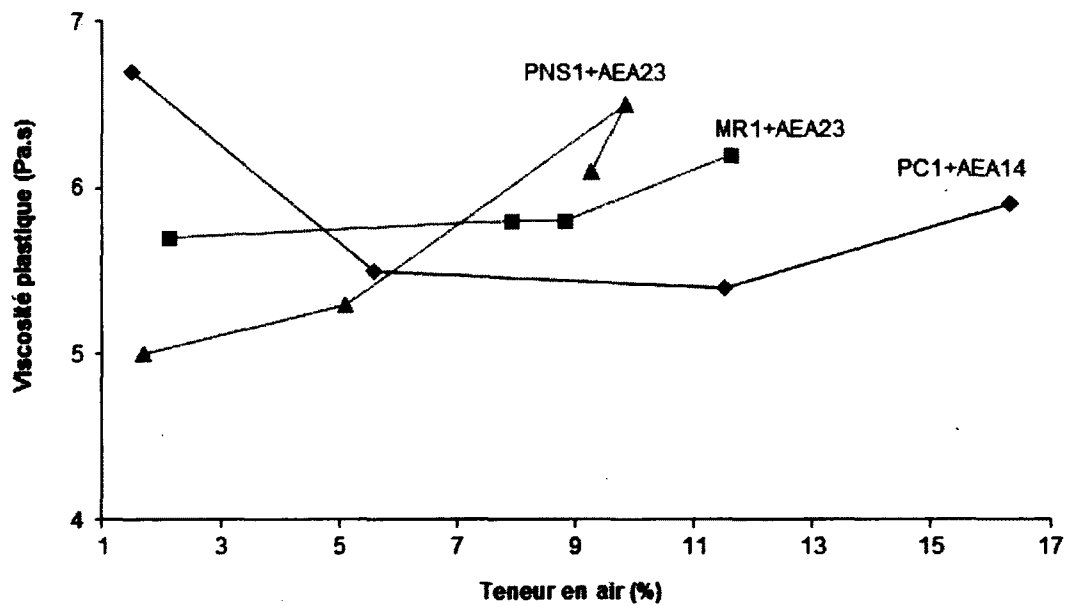


Figure 6.4 : Variation de la viscosité en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différentes combinaisons de SP/AEA

6.1.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

La maniabilité du MBE diminue dans le temps, contrairement au seuil de cisaillement et la viscosité plastique du mélange augmente, ce qui est bien expliqué dans les chapitres précédents. En augmentant le dosage en AEA, la teneur en air s'accroît et on note peu d'amélioration en ce qui concerne la rétention, tel que présenté dans les figures 6.5 à 6.7 pour la combinaison PC1+AEA14 par exemple. Les autres combinaisons de SP/AEA provoquent les mêmes effets sur la rétention des propriétés rhéologiques (Annexe A, figure A.3).

La variation de la teneur en air dans le temps dépend du type de combinaison de SP/AEA et du dosage en AEA contenu dans le MBE. Pour le MBE avec PC1+AEA14 et PNS1+AEA23 (figure 6.8 et 6.9), il n'y a pas de variation significative sur la teneur en air dans le temps. Pour celui avec MR1+AEA23 (figure 6.10), il n'y a pas de changement de la teneur en air dans le cas d'un dosage en AEA faible. Mais pour un dosage élevé d'AEA, la teneur en air du MBE augmente de 12 % à 22 % jusqu'à 70 min après le contact eau-ciment.

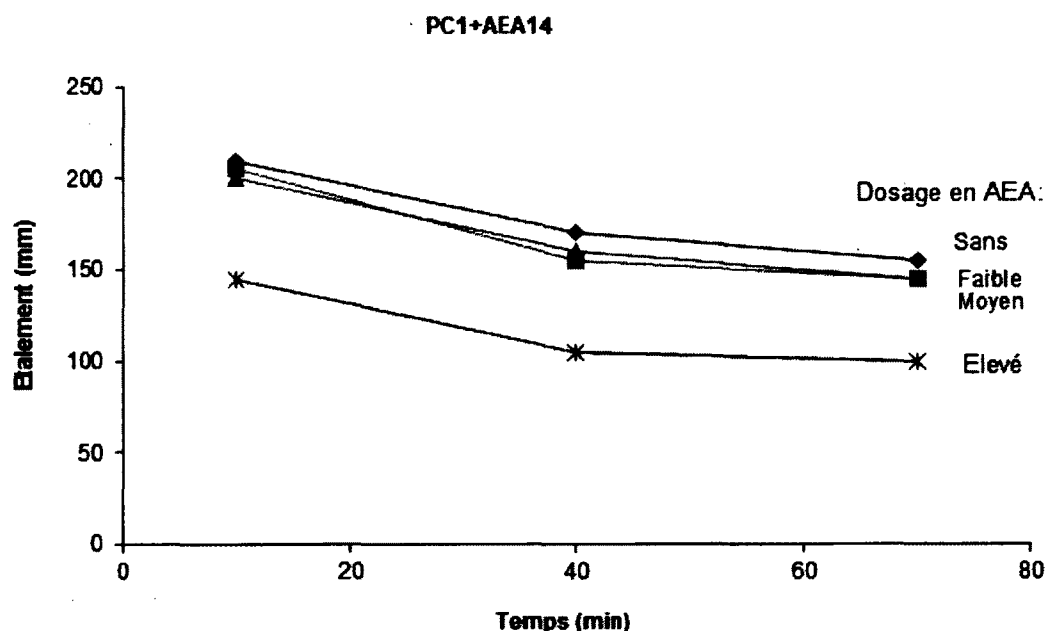


Figure 6.5 : Variation de l'étalement en fonction du temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents dosages en AEA pour le PC1+AEA14

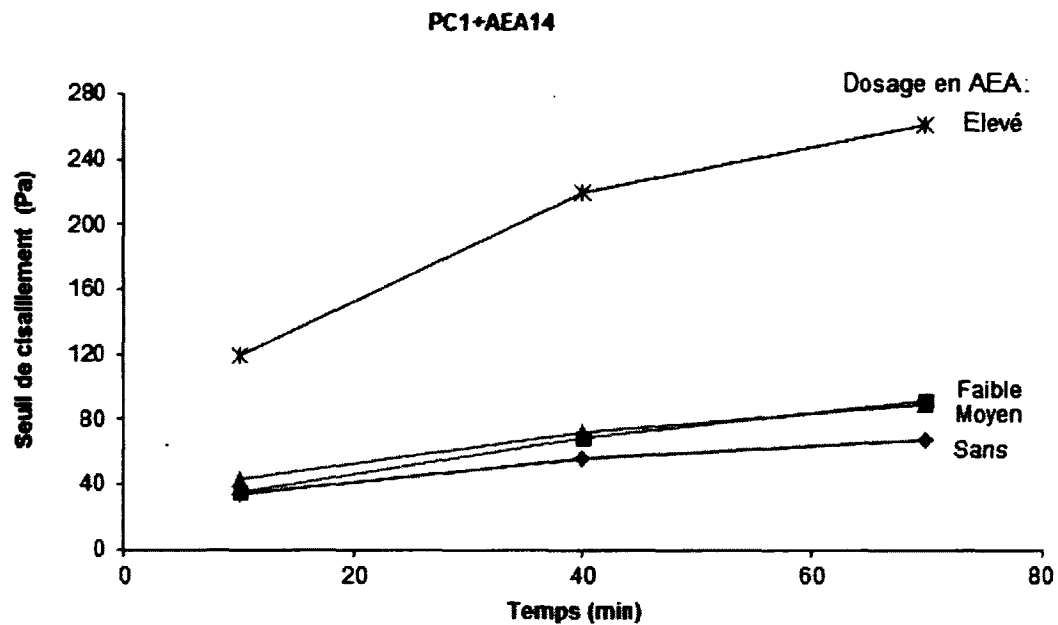


Figure 6.6 : Variation du seuil de cisaillement fonction du temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents dosages en AEA pour le PC1+AEA14

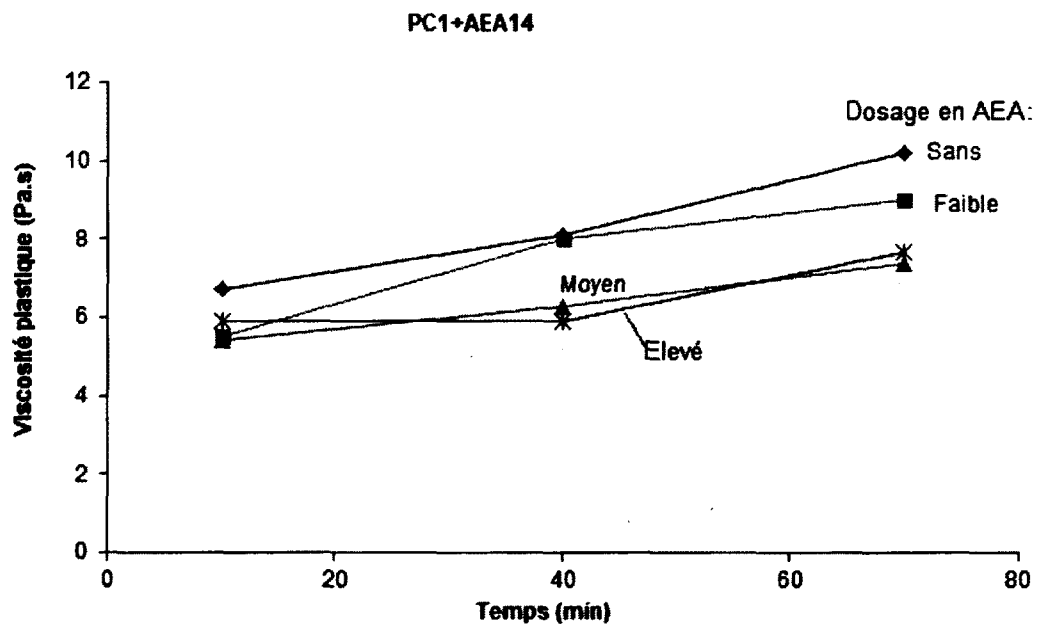


Figure 6.7 : Variation de la viscosité en fonction du temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents dosages en AEA pour le PC1+AEA14

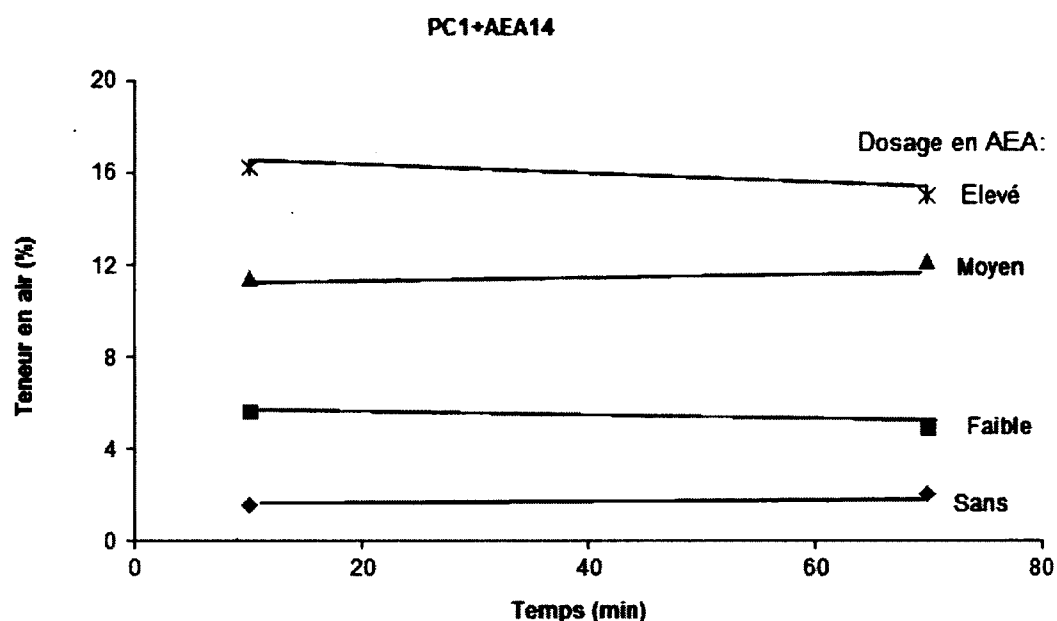


Figure 6.8 : Variation de la teneur en air en fonction du temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents dosages en AEA pour le PC1+AEA14

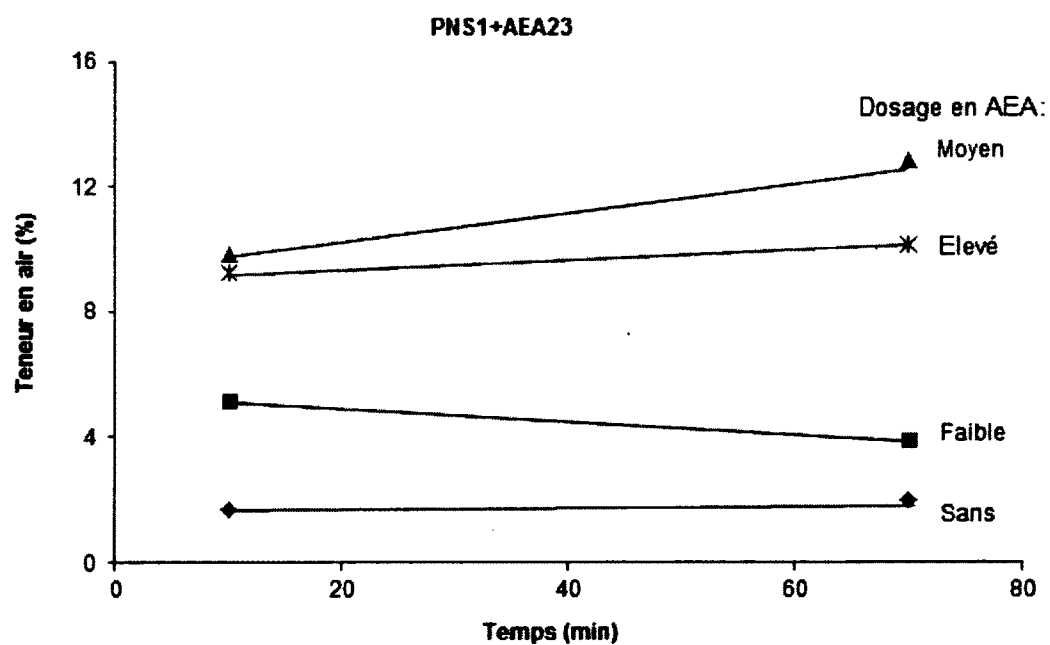


Figure 6.9 : Variation de la teneur en air en fonction du temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents dosages en AEA pour le PNS1+AEA23

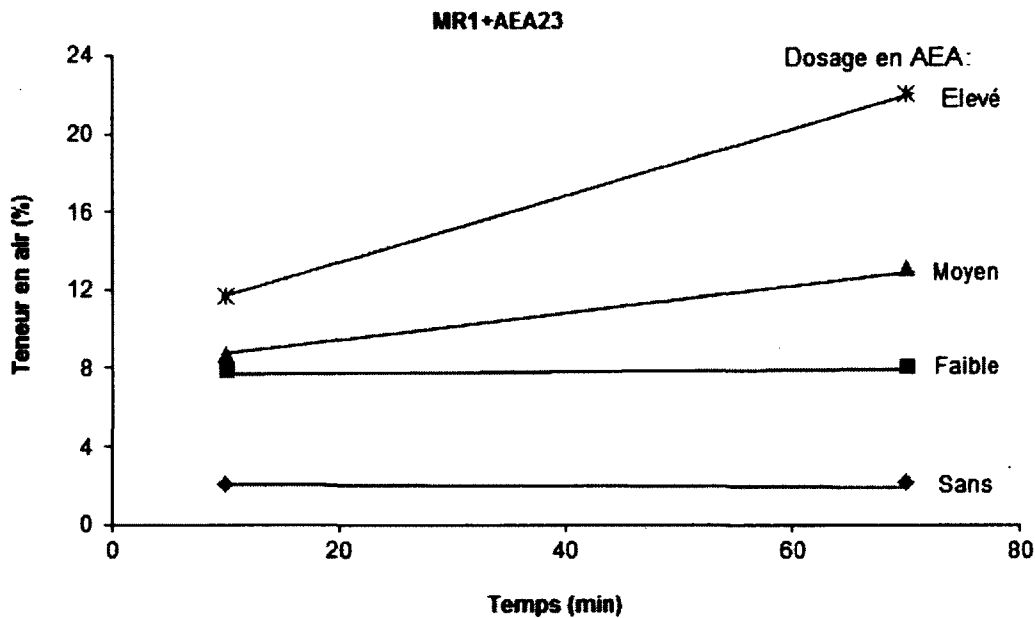


Figure 6.10 : Variation de la teneur en air en fonction du temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents dosages en AEA pour le MR1+AEA23

6.1.4 Propriétés mécaniques

Dans un rapport eau/liant constant, l'augmentation de la teneur en air correspond directement aux réductions proportionnelles de la résistance à la compression (f_c). En ce qui concerne les figures 6.11, 6.12 et 6.13, il convient de noter que l'effet de la teneur en air sur la résistance à la compression est quasiment linéaire. En outre, le pourcentage de la diminution de résistance à la compression (par rapport à la f_c initiale) en fonction de 1% d'air dépend plutôt du type de combinaison de SP/AEA employée (figure 6.14). Par exemple, dans le cas du MBE avec MR1+AEA23, une augmentation d'air de 1 % provoque une diminution de la f_c de 5 % Mpa / % air par rapport à la résistance initiale (efficacité élevée sur la f_c). Les deux autres combinaisons PC1+AEA14 et PNS1+AEA23 provoquent cette diminution plus petite (3 % MPa / % air), ce qui donne une efficacité moyenne sur la résistance à la compression.

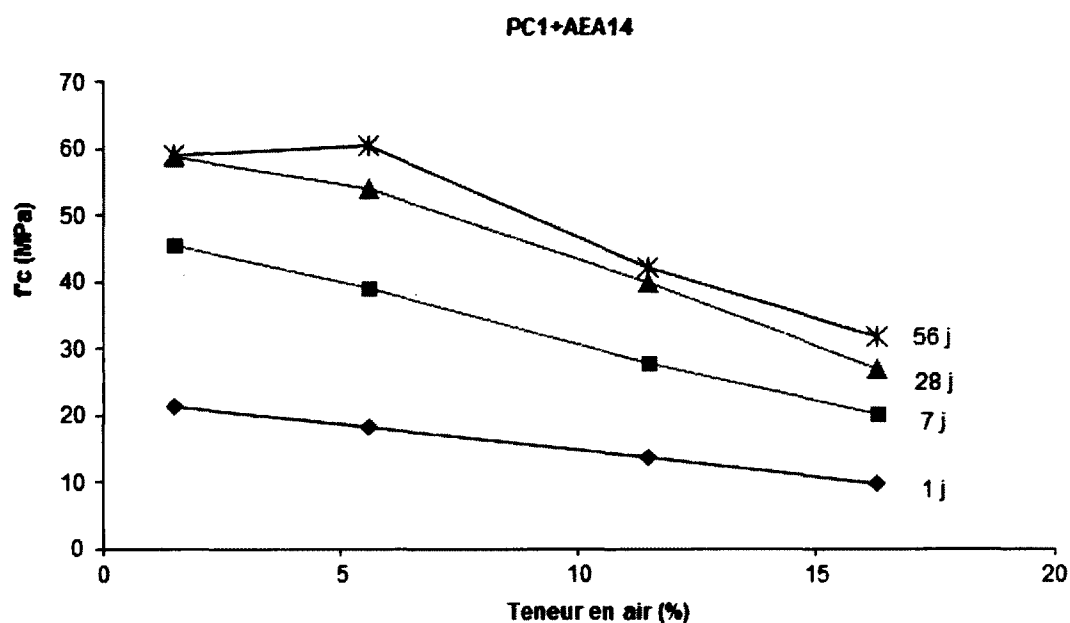


Figure 6.11 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents temps de mûrissements pour le PC1+AEA14

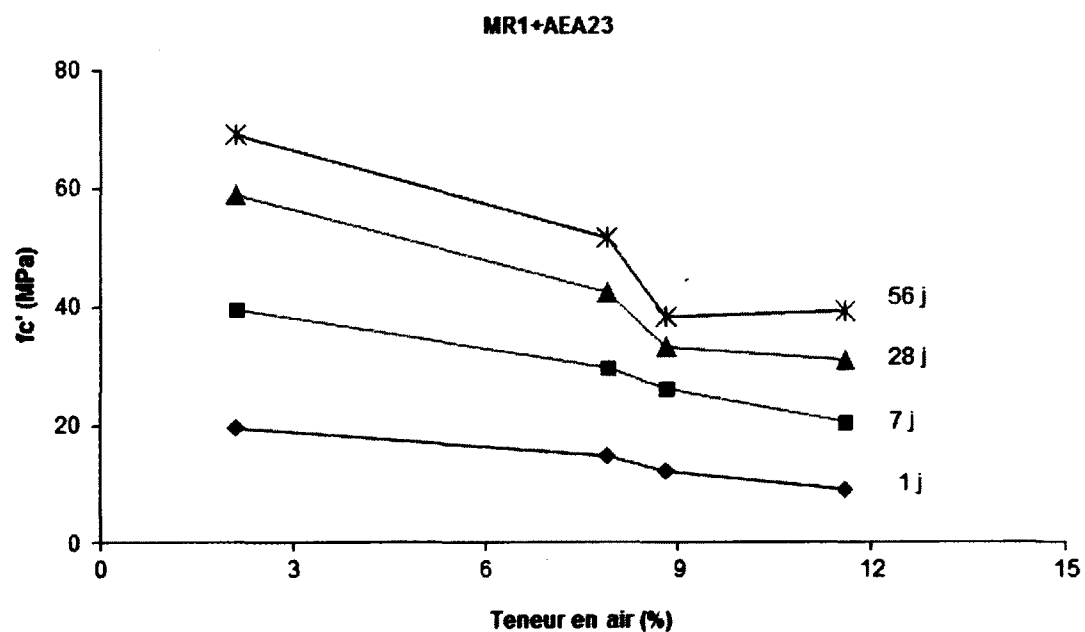


Figure 6.12 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents temps de mûrissements pour le MR1+AEA23

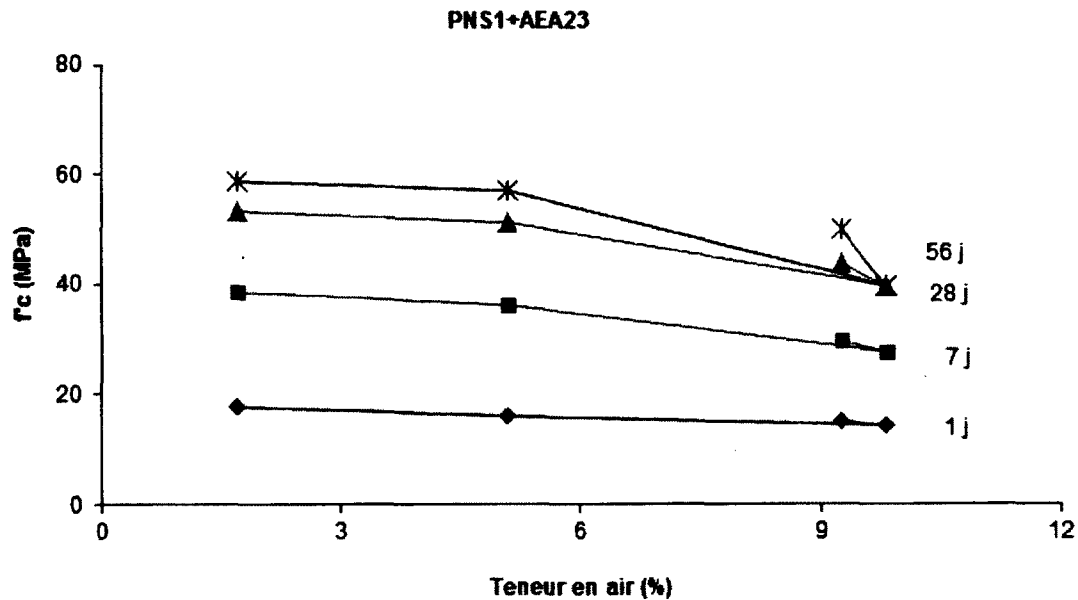


Figure 6.13 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure avec différents temps de mûrissements pour le PNS1+AEA23

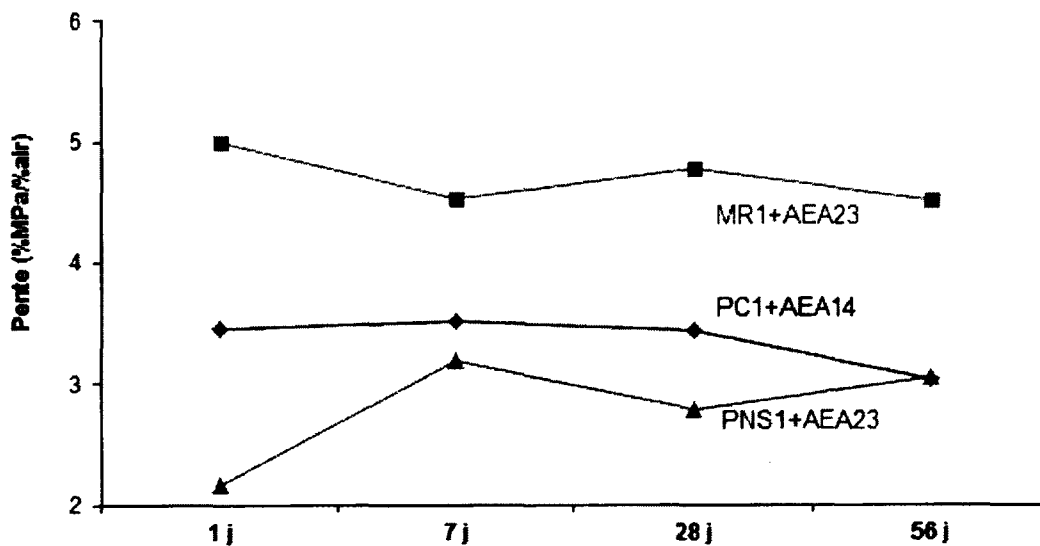


Figure 6.14 : Pourcentage de la diminution de résistance à la compression (par rapport f'_c initiale) en fonction 1% d'air pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure

6.2 Étude sur le MBE du béton de masse fluide (MBE-BMF)

Dans cette partie de l'étude, la performance et la compatibilité des trois combinaisons de SP/AEA (tableau 3.16) ont été évaluées avec quatre dosages en AEA (sans, faible, moyen, élevé), désignées pour l'application de MBE dans le béton de masse fluide (étalement = 180 mm).

6.2.1 Teneur en air

La teneur en air du MBE-BMF est présentée sur la figure 6.15. La teneur en air du MBE sans AEA est quasiment identique (4 – 5 %). En augmentant l'AEA on augmente aussi la teneur en air pour toutes les combinaisons de SP/AEA jusqu'au point de saturation. L'accroissement de teneur en air dans le MBE-BMF dépend du type de la combinaison SP/AEA employée dans le mélange. La combinaison MR2+AEA14 fait augmenter rapidement la teneur en air. Elle atteint le point de saturation (11 %) pour un dosage faible en AEA (efficacité élevée sur l'entraînement d'air). La combinaison MR1+AEA23 provoque une augmentation rapide de l'air jusqu'à 9%, puis sa teneur en air se stabilisée (efficacité moyenne). L'augmentation de la teneur en air pour la combinaison PNS2+AEA23 est un peu plus lente que dans le cas de la combinaison MR1+AEA23, et sa teneur en air peut atteindre 10 % (efficacité moyenne).

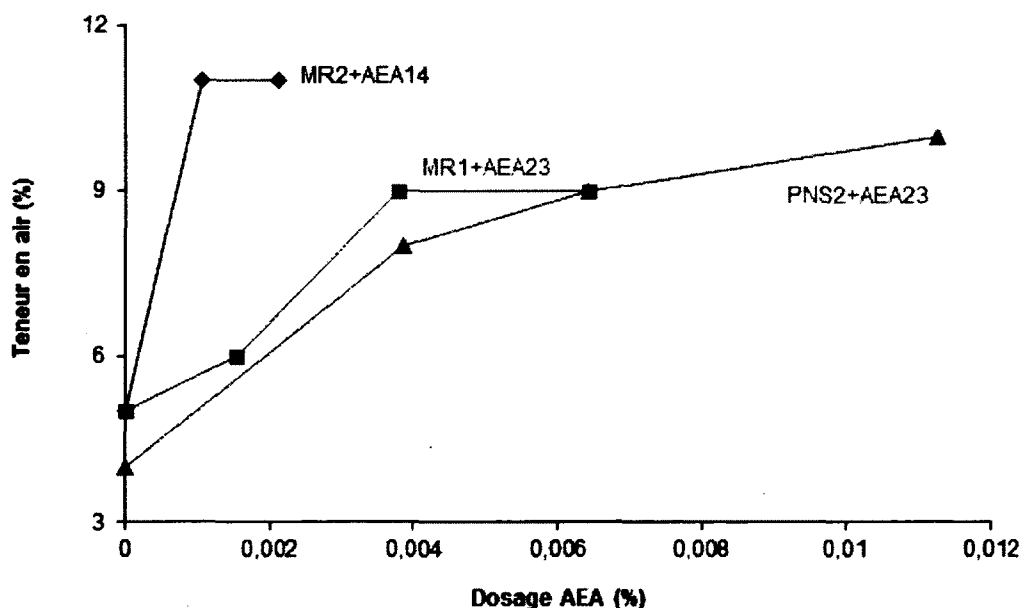


Figure 6.15 : Variation de la teneur en air en fonction du dosage en AEA pour le MBE correspondant au béton de masse fluide avec différentes combinaisons de SP/AEA

6.2.2 Propriétés rhéologiques initiales

L'effet de la teneur en air sur la maniabilité du MBE-BMF est présenté sur la figure 6.16. L'étalement du MBE sans AEA est similaire pour les trois types de combinaisons (180 mm). En augmentant le dosage en AEA, le dosage en SP reste constant, et on observe une faible variation de l'étalement initial à 10 min après le contact eau-ciment. Cette variation de la maniabilité dépend du type de combinaison employée dans le MBE-BMF. Suite à l'augmentation de la teneur en air, une faible diminution de la maniabilité (de 180 mm à 160 mm) apparaît dans le mélange avec MR1+AEA23 et PNS2+AEA23 (efficacité faible sur la maniabilité). Par contre, l'augmentation de la teneur en air dans la combinaison MR2+AEA14 produit un effet opposé, provoquant un accroissement léger de l'étalement (de 180 mm à 210 mm). La teneur en air influence aussi le seuil quand le dosage en SP est constant dans le mortier, tel que présenté sur la figure 6.17. La variation du seuil de cisaillement dépend du type de SP/AEA employé dans le mélange. Par exemple, le MR1+AEA23 et le PNS2+AEA23 conduisent à une faible augmentation du seuil de cisaillement (efficacité faible sur le seuil). Par contre la combinaison MR2+AEA14 donne un effet opposé, ce qui permet de diminuer légèrement le seuil (efficacité faible). La teneur en air sur la variation de la viscosité plastique entre 4 et 5 Pa.S, n'est pas significative (figure 6.18).

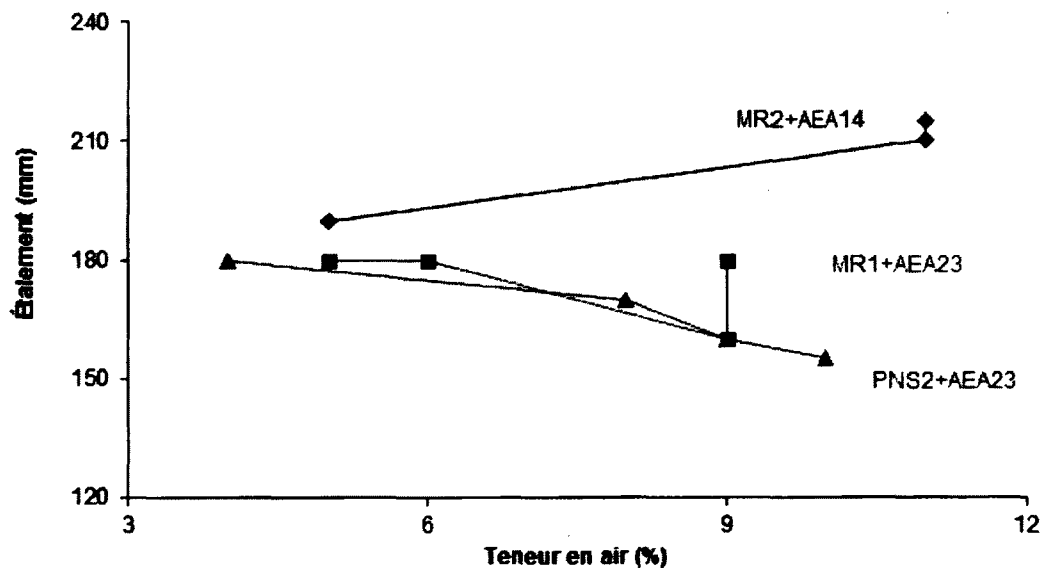


Figure 6.16 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au béton de masse fluide avec différentes combinaisons de SP/AEA

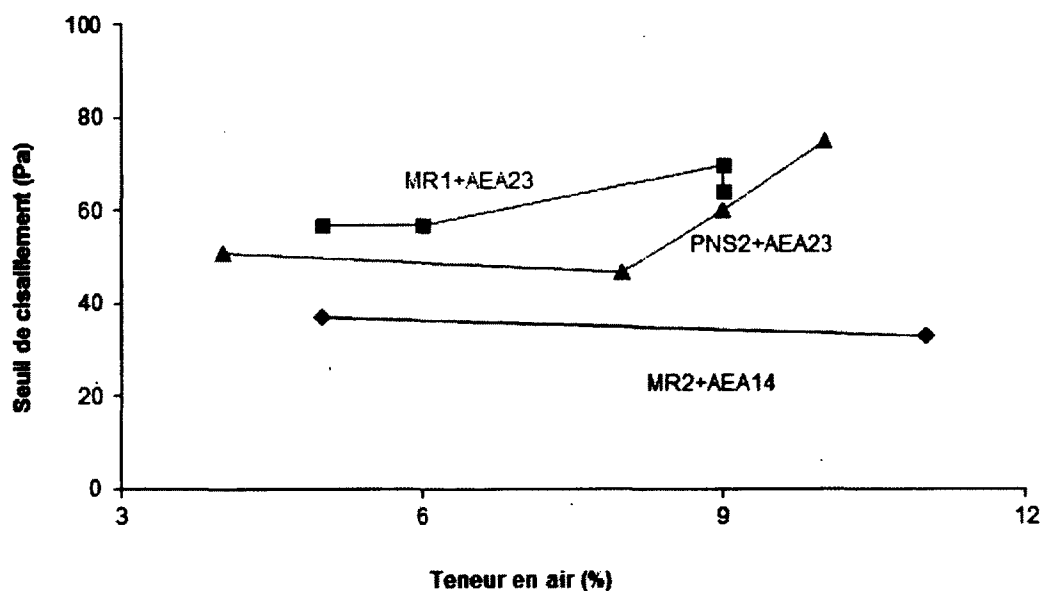


Figure 6.17 : Variation du seuil de cisaillement en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au béton de masse fluide avec différentes combinaisons de SP/AEA

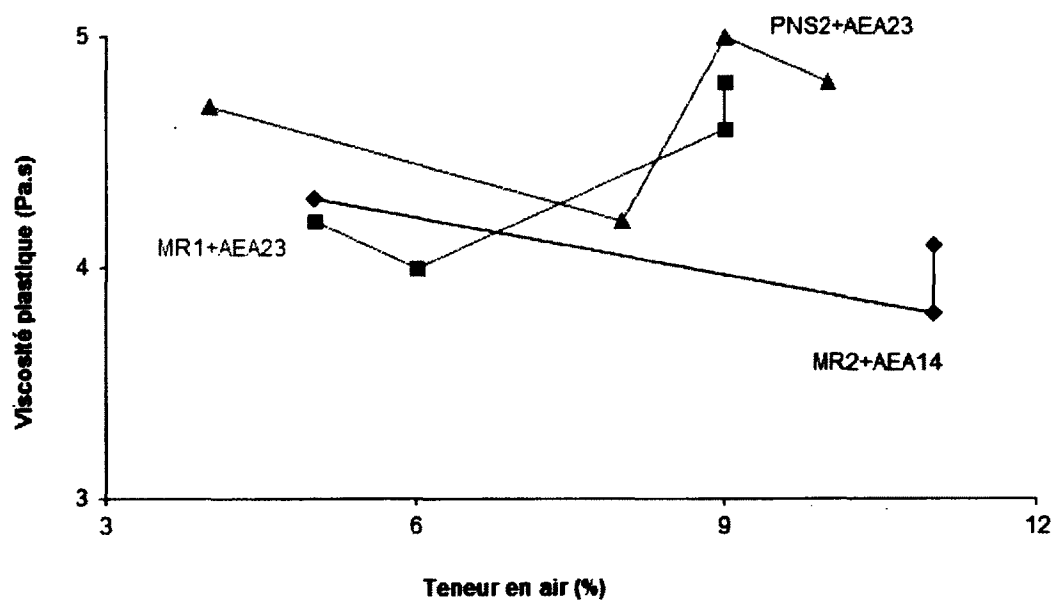


Figure 6.18 : Variation de la viscosité plastique en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au béton de masse fluide avec différentes combinaisons de SP/AEA

6.2.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

La maniabilité du MBE-BMF avec SP/AEA diminue dans le temps, contrairement au seuil de cisaillement et à la viscosité plastique qui augmentent. En augmentant le dosage en AEA, la teneur en air s'accroît, et la rétention est peu améliorée, tel que illustré sur les figures 6.19, 6.20 et 6.21 pour la combinaison MR1+AEA23 par exemple. Les résultats des autres combinaisons sont présentés dans l'annexe A, et la figure A.4.

La variation de la teneur en air dans le temps dépend du type de la combinaison SP/AEA employée et du dosage en AEA dans le MBE. Dans le cas du mélange avec MR2+AEA14, il n'y a pas d'effet significatif sur la teneur en air dans le temps (figure 6.22), alors que celui avec MR1+AEA23 (sans AEA) (figure 6.23), il n'y a pas de changement de la teneur en air. Par contre, quand la teneur en air initiale augmente, la teneur en air finale dans le MBE (70 min après le contact eau-ciment) s'accroît de 20 % par rapport à la teneur en air initiale (efficacité moyenne sur la variation d'air dans le temps). Quand au PNS2+AEA23 (figure 6.24), le MBE avec le dosage en air élevé ne montre pas de variation dans le temps. Mais ce MBE avec le dosage en AEA faible peut perdre la teneur en air de 20 % à 50 % par rapport la teneur en air initiale (efficacité moyenne).

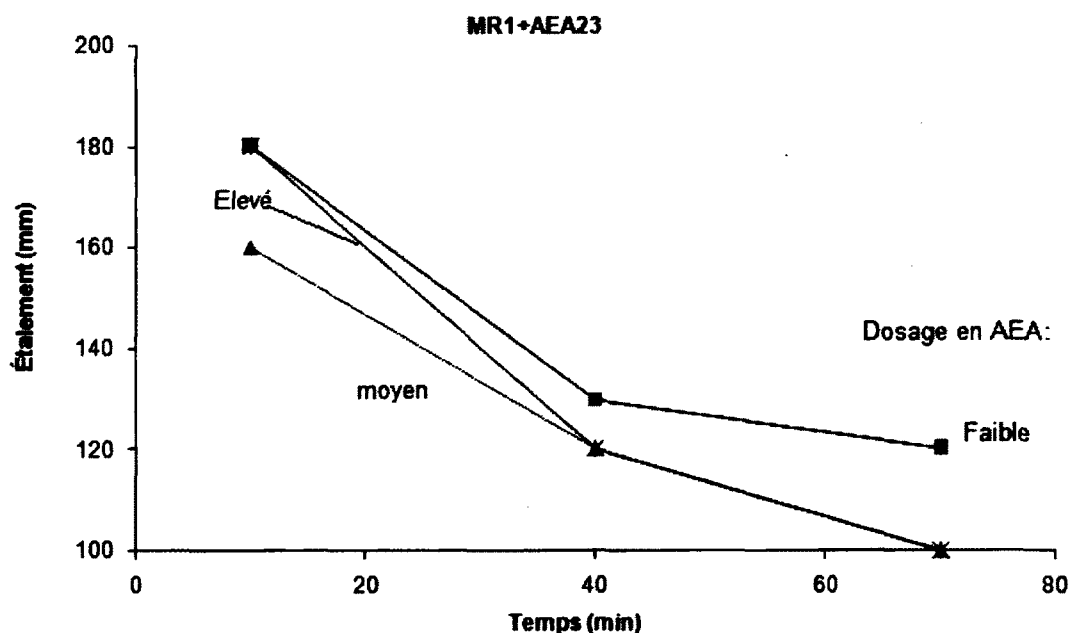


Figure 6.19 : Variation de l'étalement en fonction du temps pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le MR1+AEA23

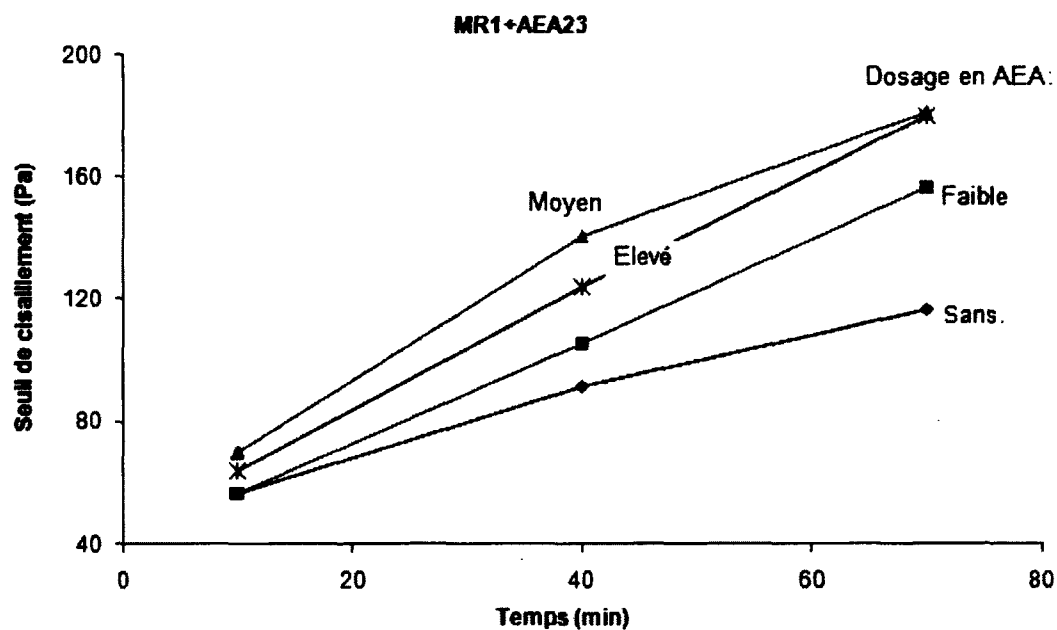


Figure 6.20 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du temps pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le MR1+AEA23

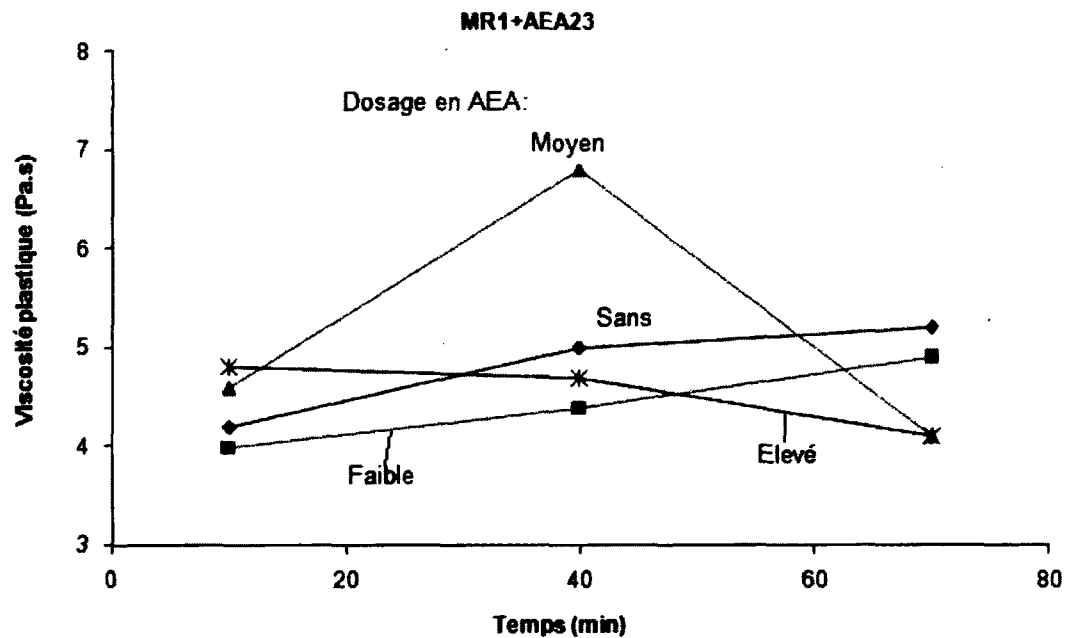


Figure 6.21 : Variation de la viscosité plastique en fonction du temps pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le MR1+AEA23

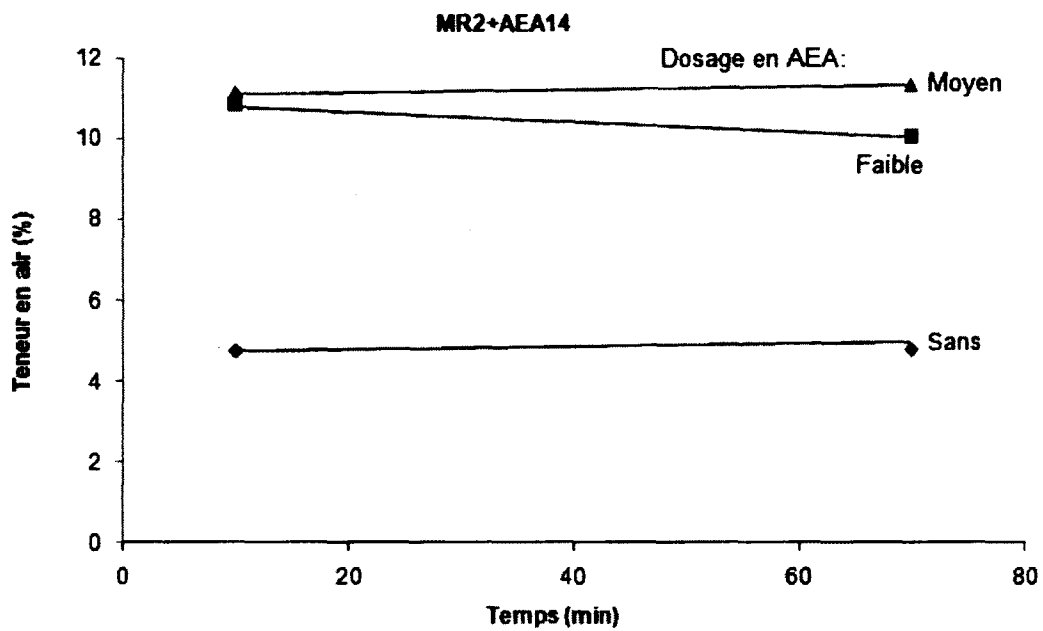


Figure 6.22 : Variation de la teneur en air en fonction du temps pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le MR2+AEA14

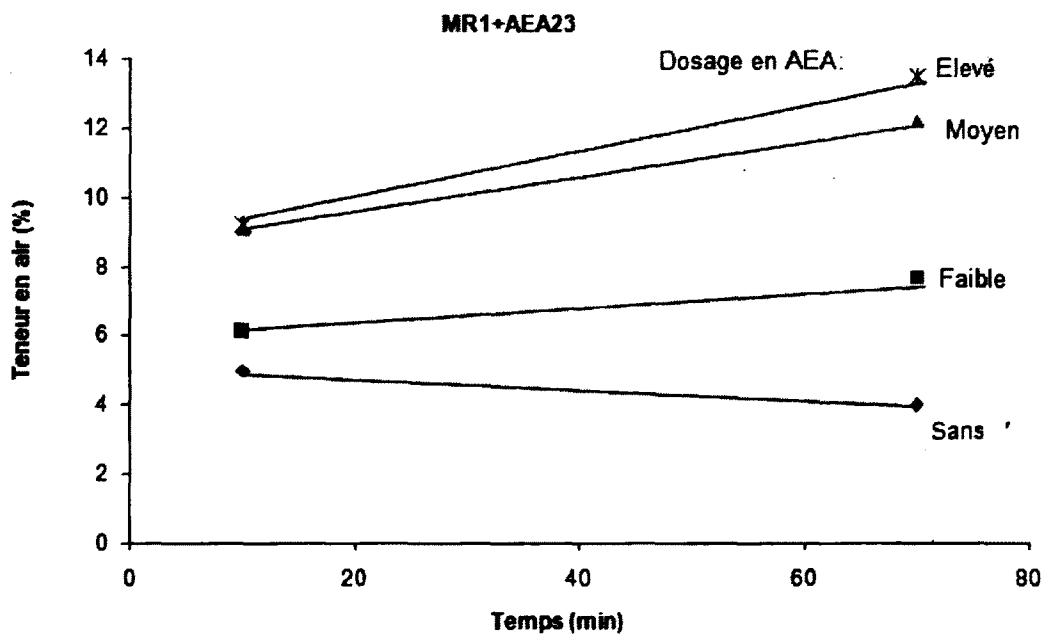


Figure 6.23 : Variation de la teneur en air en fonction du temps pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le MR1+AEA23

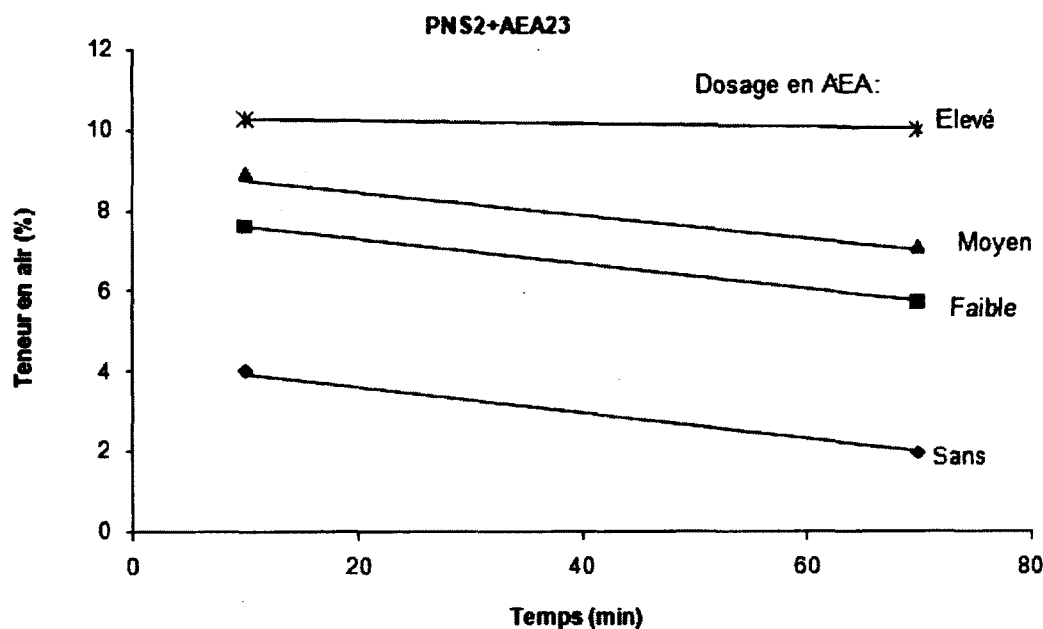


Figure 6.24 : Variation de la teneur en air en fonction du temps pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le PNS2+AEA23

6.2.4 Propriétés mécaniques

Le rapport eau/liant constant, l'augmentation de la teneur en air correspond directement aux réductions proportionnelles de la résistance à la compression. Pour ce qui est des figures 6.25, 6.26 et 6.27, il convient de noter que l'effet de la teneur en air sur la résistance est quasiment linéaire pour le MBE-BMF. En outre, la diminution de résistance à la compression par 1 % de la teneur en air dépend du type de la combinaison SP/AEA utilisée (figure 6.28). L'augmentation de 1 % d'air dans le MBE avec MR1+AEA23, il y a une diminution de la f_c vers 7 % MPa / % air par rapport à résistance initiale (efficacité élevée sur la diminution de f_c). Les deux autres combinaisons MR2+AEA14 et PNS2+AEA23 provoquent une diminution moindre (± 5 %), ce qui donne une efficacité moyenne sur la résistance à la compression.

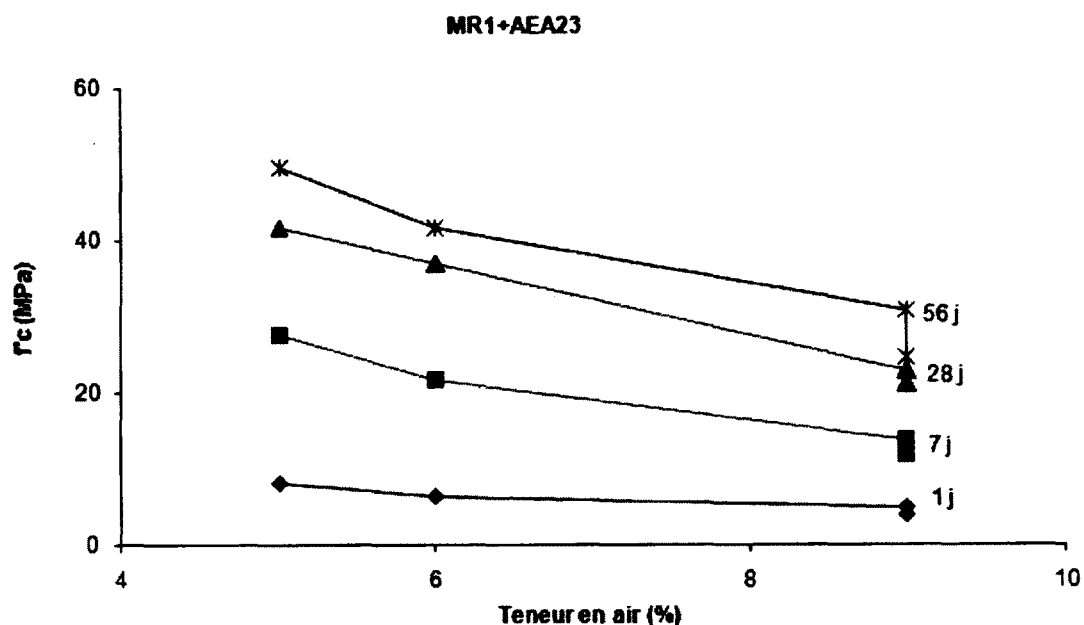


Figure 6.25 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le MR1+AEA23

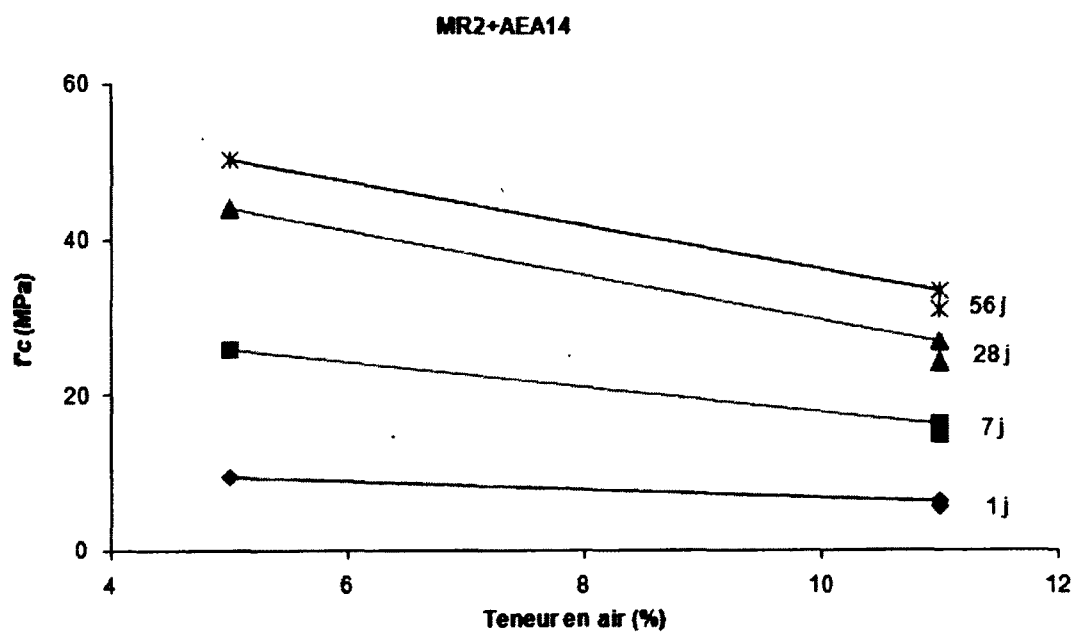


Figure 6.26 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le MR2+AEA14

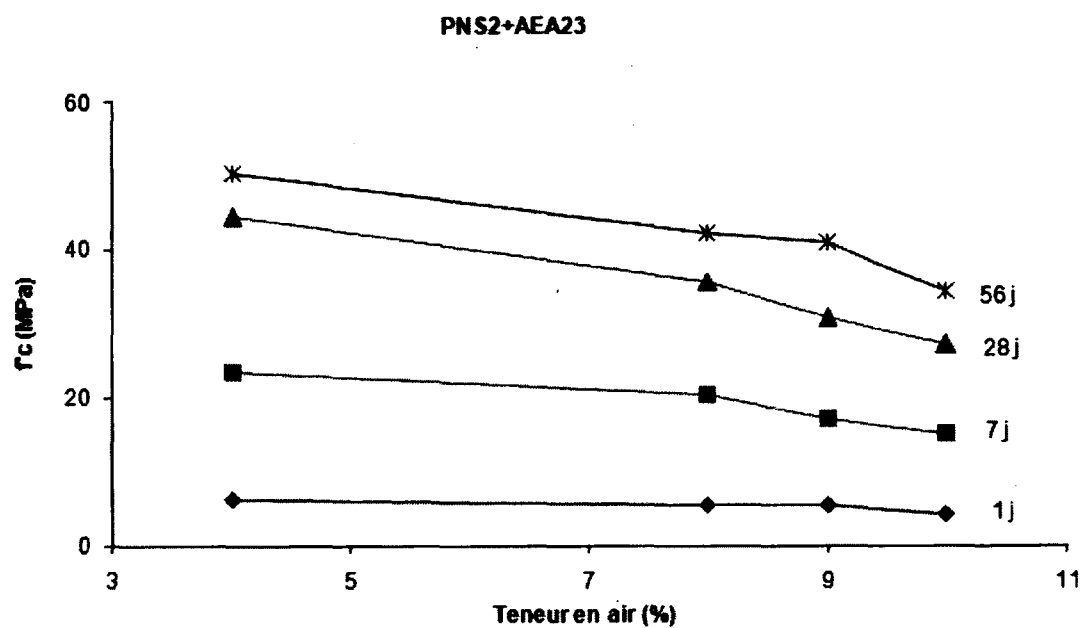


Figure 6.27 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en air pour le MBE correspondant au béton de masse fluide pour le PNS2+AEA23

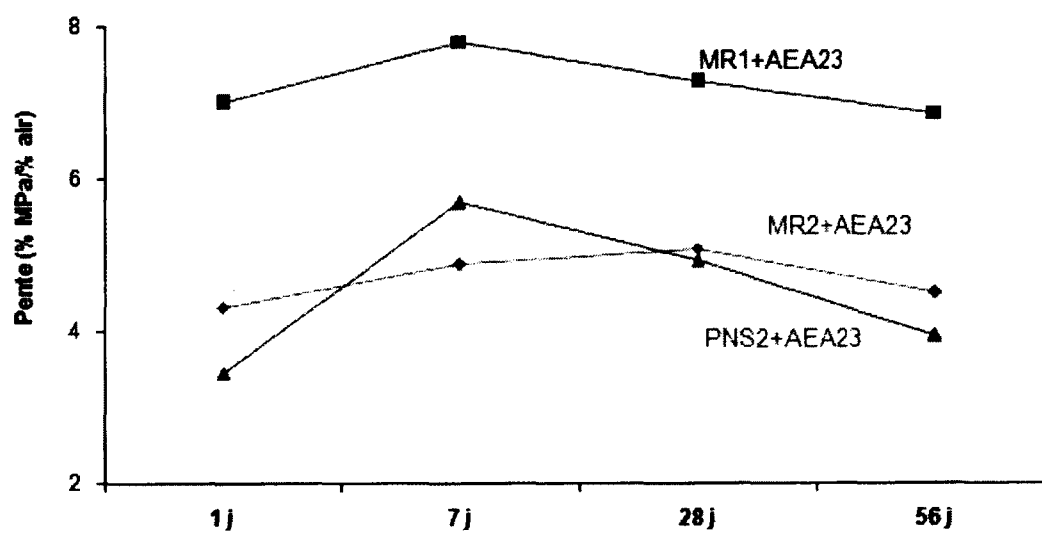


Figure 6.28 : Pourcentage de la diminution de résistance à la compression (par rapport f_c initiale) en fonction de 1% d'air pour le MBE correspondant au béton de masse fluide

6.3 Discussion

Cette section compare l'effet de combinaisons de superplastifiants et d'agents entraîneurs d'air sur les propriétés de deux types de MBE à rhéologie adaptée (MBE-BSAP et MBE-BMF). Le rapport E/L, le type de ciment, la teneur en liant et la teneur en sable sont différentes dans ces différentes compositions de MBE, présentées dans le tableau 3.10.

6.3.1 Teneur en air

La teneur en air du MBE-BMF présentée dans la figure 6.15 montre que celle de MBE sans AEA est quasiment identique (4 - 5%). Cette valeur est 2 fois plus grande que celle du MBE-BSAP (figure 6.1), qui est due à la maniabilité initiale et à la différence de composition différente. En effet, la maniabilité et la composition du mortier peuvent varier la compacité du mélange, ce qui influence la teneur en air mesurée. En outre, le point de saturation d'une même combinaison de SP/AEA varie selon la composition. Par exemple la teneur en air du mélange avec MR1+AEA23 dans le MBE-BSAP peut atteindre 12 %, contrairement au MBE-BMF qui a son point de saturation à 9 %. L'efficacité de l'AEA dépend de sa nature et aussi de la composition du MBE. Dans les deux compositions (le MBE-BSAP et le MBE-BMF), la combinaison MR2+AEA14 provoque plus rapidement un accroissement d'air. Son point de saturation apparaît à un dosage faible d'AEA, ce qui peut causer les problèmes sur le chantier lors du contrôle de la teneur en air. L'incorporation d'AEA facilite davantage l'entraînement d'air dans le MBE-BSAP que dans le MBE-BMF à cause de l'influence de la maniabilité et la composition du mortier.

6.3.2 Propriétés rhéologiques initiaux

Quand le dosage en AEA augmente et que le dosage en SP reste constant, la maniabilité du MBE-BSAP diminue, mais cette diminution est faible pour le MBE-BMF. En effet, l'AEA entraîne l'air, ce qui forme les microstructures. Si le mortier est visqueux et pas assez fluide, il n'y pas suffisamment de SP et de ciment pour former la phase liquide (gel), les microstructures qui forment par l'air jouent un rôle de lubrifiant, ce qui aide à diminuer le seuil et la viscosité. Mais si le mortier n'est pas visqueux et assez fluide, comparer avec l'effet de SP, l'effet de microstructures qui forment par l'air n'est pas très claire. La variation du seuil est directement liée à la perte de maniabilité, par conséquent, les seuils pour la combinaison de SP/AEA dans le

MBE-BSAP s'accroissent en augmentant la teneur en air et la variation du seuil dans le MBE-BMF n'est pas significative. Pour la plupart des mélanges, l'effet de teneur en air sur la viscosité est faible sauf pour la combinaison PNS1+AEA23 dans le MBE-BSAP. L'augmentation de la teneur en air de cette dernière combinaison provoque une augmentation de la viscosité légèrement plus grande que les autres combinaisons.

6.3.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

La maniabilité du MBE-BSAP et du MBE-BMF avec SP/AEA diminue dans le temps et le seuil de cisaillement augmentent, mais la viscosité varie légèrement. L'incorporation d'agent entraîneur d'air dans ces deux types de MBE ne provoque pas un effet significatif sur la rétention des propriétés rhéologiques dans le temps. Mais les différentes combinaisons de SP/AEA et les différents dosages en AEA dans le MBE influencent la stabilité de la teneur en air dans le temps. Dans les deux types de MBE, l'accroissement du dosage en AEA dans la combinaison MR1+AEA23 s'accompagne d'une augmentation d'air jusqu'à 70% par rapport à la teneur en air initiale à 10 min après le contact eau-ciment. La combinaison PNS2+AEA23 dans le MBE-BMF perd la teneur en air dans le temps sauf pour le haut dosage en AEA, ce qui cause un problème pour la durabilité, par exemple la résistance de gel/dégel etc.

6.3.4 Propriétés mécaniques

L'effet de la teneur en air sur la résistance à la compression est linéaire. L'augmentation de la teneur en air correspond directement aux réductions proportionnelles de la résistance à la compression. Cependant, ce pourcentage de réduction sur la résistance par rapport à la résistance initiale (sans AEA) dépend du type de combinaison de SP/AEA. Dans les deux types de MBE (MBE-BSAP et MBE-BMF), la combinaison MR1+AEA23 réduit le plus de la résistance à la compression pour le même accroissement de la teneur en air par rapport aux autres combinaisons. En outre, l'utilisation de la même combinaison dans les différents MBE montre que le MBE-BMF réduit davantage la résistance à la compression en même accroissement de la teneur en air que le MBE-BSAP.

6.4 Conclusion

L'influence des combinaisons de SP/AEA est évaluée dans les 2 types de MBE (MBE-BSAP et MBE-BMF). Les tableaux 6.1 et 6.2 présentent l'effet de la combinaison de SP/AEA et du dosage en AEA sur le comportement de la maniabilité, des propriétés rhéologiques, de la résistance à la compression et des variations dans le temps de ces deux types de MBE.

- L'entraînement d'air est plus facile dans un MBE qui est plus fluide (MBE-BSAP>MBE-BMF)
- Il existe un point de saturation sur la teneur en air pour les combinaisons de SP/AEA.
- L'incorporation d'air entraîné diminue généralement l'étalement et augmente le seuil de cisaillement, tandis que l'effet sur la viscosité plastique est faible; cet effet dépend du type MBE et de la combinaison de SP/AEA.
- La présence d'air entraîné réduit la résistance en compression du MBE; cet effet dépend du type de MBE et de la combinaison de SP/AEA:

MBE-BSAP: de 2 % (PNS1+AEA23) à 5 % (MR1+AEA23) per % d'air

MBE-BMF: de 4-5 % (MR2+AEA14) à 7-8 % (MR1/AEA23) per % d'air

Tableau 6.1 : Effets de la teneur en air sur les propriétés du MBE-S-BAP

MBE-BSAP	PC1+AEA14	MR1+AEA23	PNS1+AEA23
Teneur en air	I	II	III
Perte de maniabilité	III	II	I
Augmentation du seuil	III	II	I
Augmentation de la viscosité	III	III	II
Augmentation de la teneur en air dans le temps	-	II	-
Résistance à la compression	II	I	II

Tableau 6.2 : Effets de la teneur en air sur les propriétés du MBE-BMF

MBE-BMF	MR2+AEA14	MR1+AEA23	PNS2+AEA23
Teneur en air	I	II	II
Perte de maniabilité	III	III	III
Augmentation du seuil	III	II	II
Augmentation de la viscosité	-	-	-
Augmentation de la teneur en air dans le temps	-	II	II
Résistance à la compression	II	I	II

I : Efficacité élevée

II : Efficacité moyenne

III : Efficacité faible

- : Peu d'effet

CHAPITRE 7

Validation sur béton

Le béton autoplaçant pour la construction des bâtiments (BAP-B) et le béton de masse avec une fluidité identique au béton semi-autoplaçant (BSAP-BM), ont été validé dans ce chapitre afin de vérifier la corrélation entre le mortier de béton équivalent (MBE) et le béton sur les propriétés rhéologiques et mécaniques.

7.1 Étude sur le BAP pour la construction des bâtiments (BAP-B)

Dans cette partie de l'étude, la validation des trois combinaisons des superplastifiantes et des agents entraîneurs d'air (SP/VEA) est réalisée afin d'établir une corrélation entre le MBE et le BAP-B ainsi que pour valider la méthode MBE. Ces trois combinaisons sont choisies entre les résultats sur le MBE (voir partie 5.1). Les dosages en VEA utilisés dans le BAP-B sont les mêmes que pour le MBE-BAP-B. Une faible quantité d'agent désentraîneur d'air est incorporée dans le béton (la teneur en air $< 1\%$) dans cette sous-section.

7.1.1 Demande en SP

La demande en SP en fonction des différents dosages en VEA pour un étalement identique (± 680 mm) du BAP-B est présentée dans la figure 7.1. En comparant la figure 5.1 du chapitre 5 et la figure 7.1, la tendance de la demande en SP pour le MBE-BAP-B et BAP-B est similaire. Dans les deux mélanges cimentaires, la combinaison PNS1+VEA23 possède la plus faible augmentation du dosage en SP par rapport au dosage en SP initial ($< 10\%$). Cette combinaison donne la meilleure comptabilité (efficacité élevée). Les autres combinaisons PC/VEA exigent un dosage en SP plus élevé afin de maintenir la même maniabilité tant en augmentant le dosage en VEA (efficacité moyenne). La figure 7.2 montre que la demande en SP de la même combinaison pour le MBE-BAP-B et BAP-B est identique; le dosage en adjuvants utilisé pour le MBE-BAP-B peut être appliqué directement au BAP-B. Par conséquent, il convient de noter que la méthode MBE constitue une méthode fiables notamment pour la mise au point des bétons adjuvantés pour le BAP.

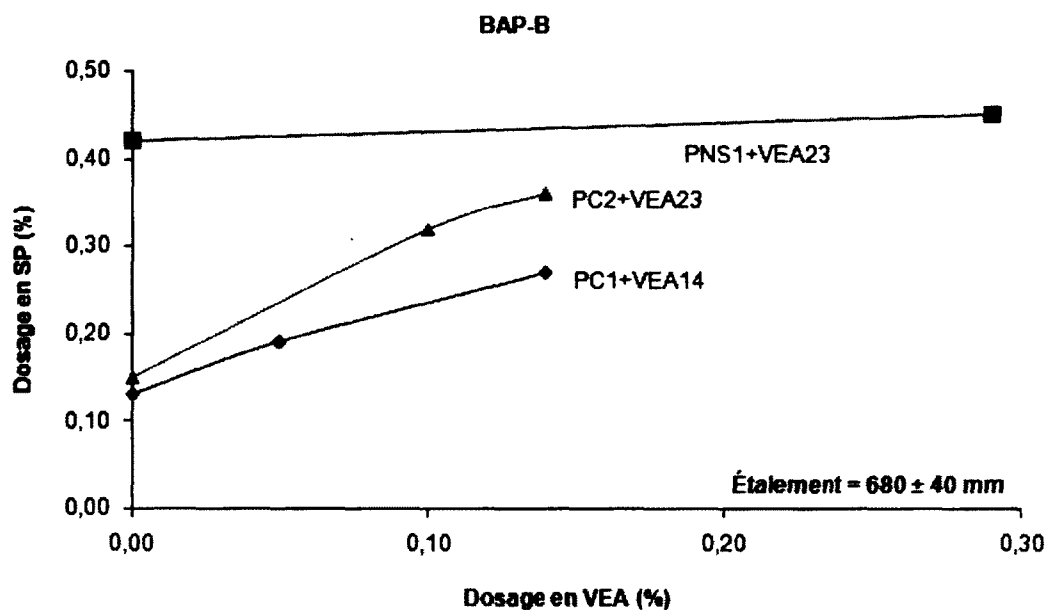


Figure 7.1 : Variation du dosage en SP en fonction du dosage en VEA pour le BAP pour la construction des bâtiments avec trois combinaisons de SP/VEA

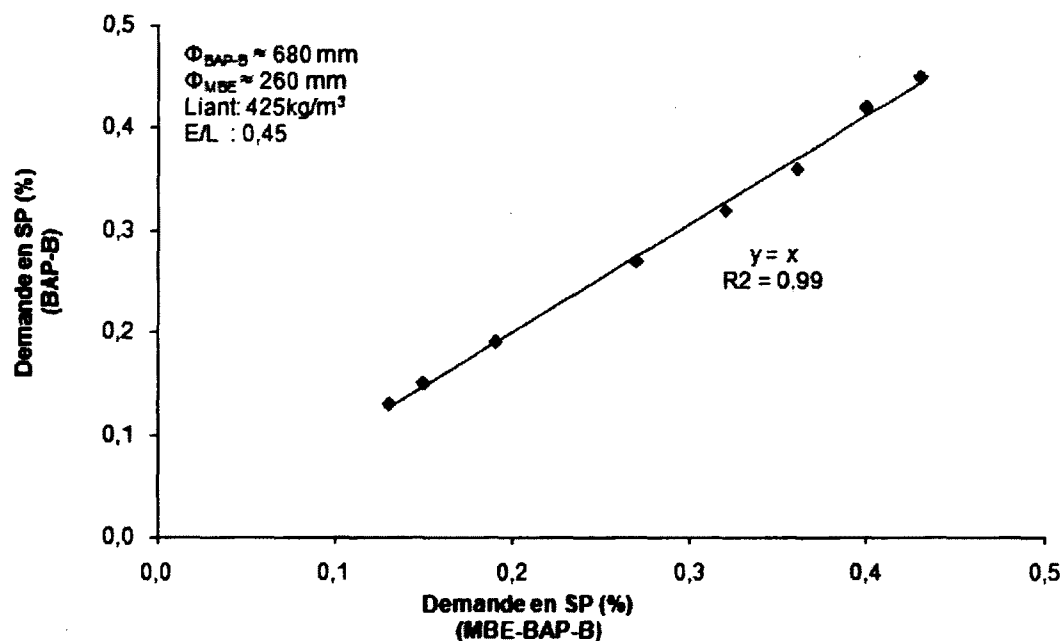


Figure 7.2 : Variation de la demande en SP du BAP-B en fonction de celle du MBE-BAP-B avec trois types de combinaison de SP/VEA

7.1.2 Propriétés rhéologiques initiaux

Dans le MBE-BAP-B et le BAP-B, les maniabilités et les seuils de cisaillement initiaux sont presque identiques étant donné que leurs étalements initiaux sont contrôlés. La viscosité plastique du MBE-BAP-B et du BAP-B est présentée simultanément dans la figure 7.3. Il convient de noter que les viscosités plastiques de ces deux mélanges cimentaires possèdent ainsi une bonne corrélation linéaire. Si la viscosité plastique est plus grande dans le MBE-BAP-B, elle doit être ainsi plus grande que celle du BAP-B. Cependant la viscosité plastique du BAP-B est cinq fois plus grande que celle de MBE-BAP-B, ce qui est dû à la présence des granulats dans le béton.

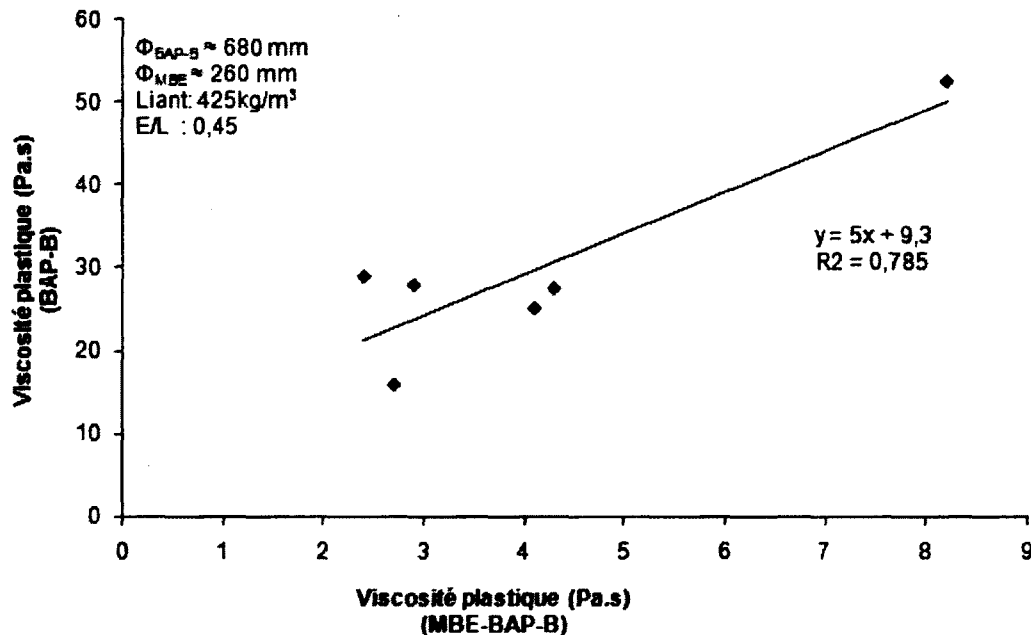


Figure 7.3 : Variation de la viscosité plastique du BAP-B en fonction de celle du MBE-BAP-B avec trois types de combinaison de SP/VEA

7.1.3 Rétention des propriétés rhéologiques dans le temps

La rétention de la maniabilité (étalement), du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique dans le temps pour le BAP-B est similaire à celle du MBE-BAP-B. Les figures 7.4, 7.5 et 7.6 présentent les résultats sur la rétention des propriétés rhéologiques dans le temps de la combinaison PC1+VEA14 utilisée dans le BAP-B. Les résultats des autres combinaisons de BAP-B sont montrés dans l'annexe A, la figure A.5. En augmentant le dosage en VEA, la demande en SP augmente simultanément afin de maintenir l'étalement, une amélioration de la perte de maniabilité et de la variation de seuil apparaît, mais l'augmentation de la viscosité dans le temps ne varie pas significativement dans le BAP-B. L'effet de l'augmentation du dosage en VEA (SP) pour le BAP-B est similaire que celui observé pour le MBE-BAP-B.

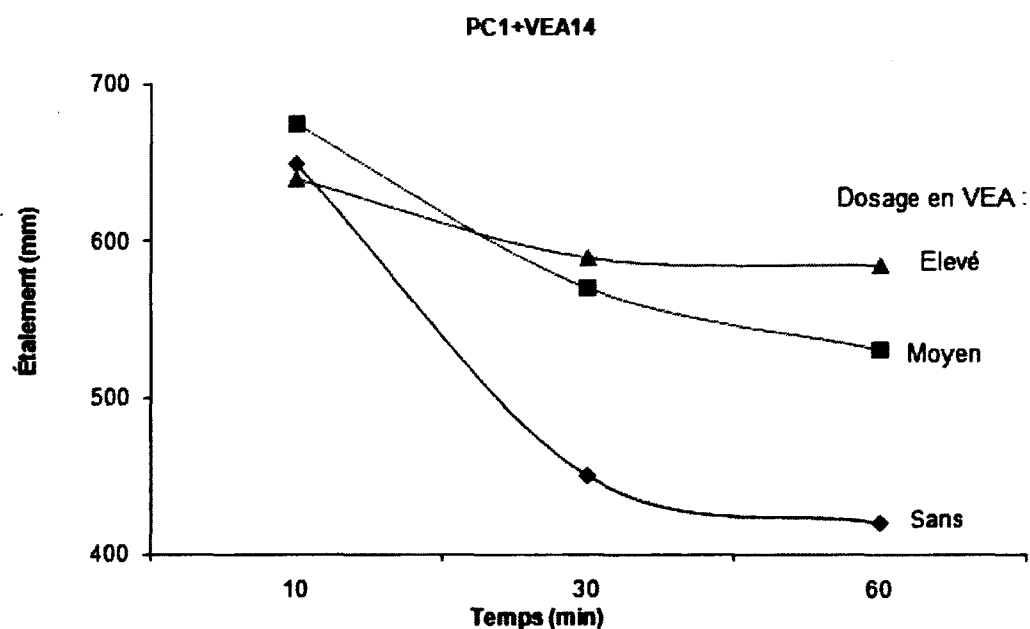


Figure 7.4 : Variation de l'étalement en fonction du temps pour le BAP pour la construction des bâtiments avec le PC1+VEA14

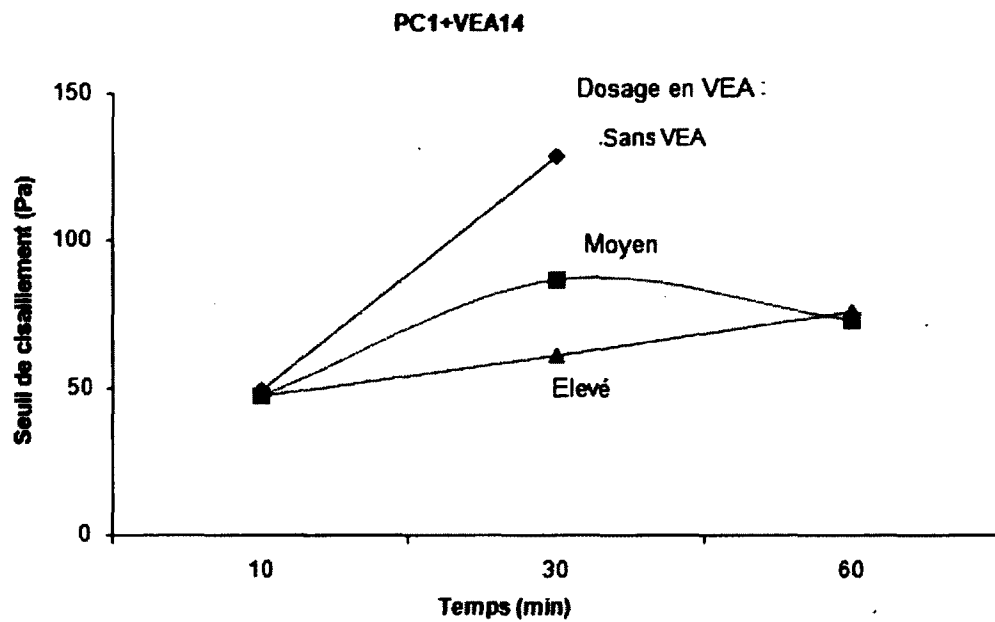


Figure 7.5 : Variation du seuil de cisaillement en fonction du temps pour le BAP pour la construction des bâtiments avec le PC1+VEA14

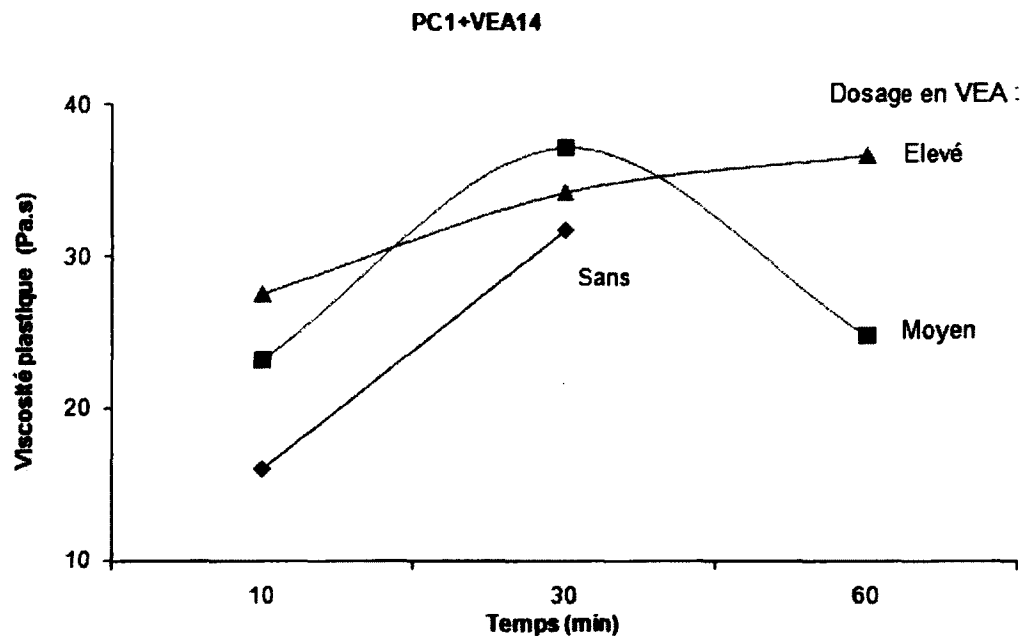


Figure 7.6 : Variation de la viscosité plastique en fonction du temps pour le BAP pour la construction des bâtiments avec le PC1+VEA14

La figure 7.7 montre que la perte de maniabilité s'améliore avec l'augmentation du dosage en VEA (SP), pour toutes les combinaisons testées dans le BAP-B, ce qui est lié directement à l'augmentation du seuil dans le temps. En comparant la figure 7.7 avec la figure 5.7 du chapitre 5, la même tendance à la diminution de la perte de maniabilité à différents dosages en VEA est observée pour le MBE-BAP-B et le BAP-B. Par exemple, la diminution de la perte de maniabilité pour la combinaison PNS1+VEA23 est moins importante que celle du PC/VEA. A dosage en VEA élevé, la perte de maniabilité du mélange avec la combinaison PC2+VEA23 est plus grande que celle à dosage en VEA moyen dans les mélanges cimentaires de MBE-BAP-B et BAP-B. La méthode MBE est donc une bonne méthode pour prédire la rétention des propriétés rhéologiques dans le temps.

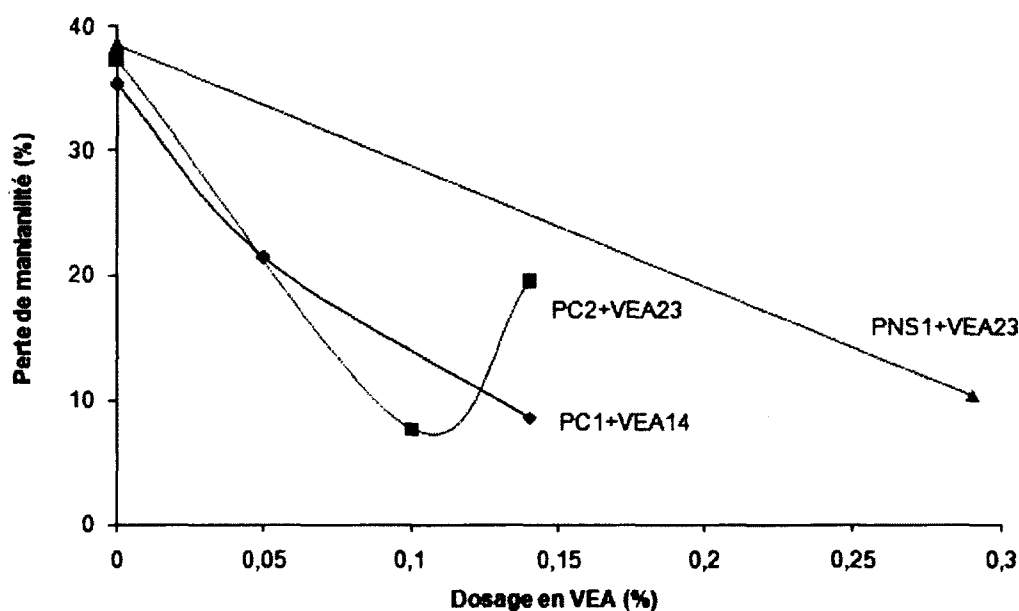


Figure 7.7 : Perte de maniabilité après 60 min pour le BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA

7.1.4 Ségrégation statique

La stabilité du béton est testée à l'aide de la colonne de ségrégation, selon la norme ASTM C1610/C 1610 M-06a. Pour un étalement fixe du BAP-B (± 680 mm), en augmentant le dosage en VEA, le pourcentage de ségrégation diminue et donc la stabilité du béton est améliorée. Pour qu'un soit béton stable, sa ségrégation statique doit être supérieure de 15 %. La figure 7.8 montre que le BAP-B avec tous les types de combinaison de SP/VEA employée peut atteindre un niveau « stable » en réglant le dosage en VEA. Cependant, ce dosage en VEA afin d'éviter le phénomène de ségrégation est différent de l'un à l'autre. La combinaison PNS1+VEA23 nécessite d'une quantité de VEA plus importante que celle utilisée dans la combinaison PC/VEA, à cause des différences de compatibilité et d'efficacité entre les SP et les VEA. Par contre, comme il a été expliqué au chapitre 5, l'essai de ressuage forcé pour le MBE n'explique pas la stabilité du mortier. Il en résulte que l'indice de ressuage forcé pour le mortier ne peut pas être lié directement avec la stabilité du béton.

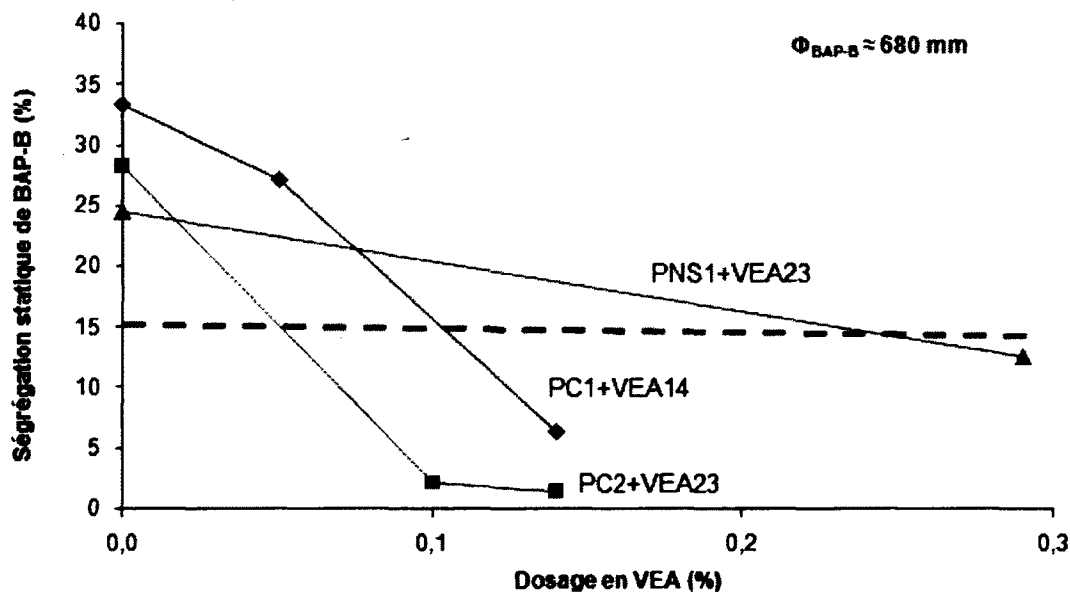


Figure 7.8 : Pourcentage de ségrégation en fonction du dosage en VEA pour le BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA

7.1.5 Propriétés mécaniques

Comparativement à la figure 5.9 du chapitre 5 pour le MBE-BAP-B, une remarque similaire sur la résistance à la compression à jeune âge (figure 7.9) est observée pour le BAP-B. L'augmentation du dosage en VEA (SP) réduit la résistance à la compression (f_c) à 1 jour. En effet, avec le dosage en VEA élevé, la demande en SP augmente, ce qui peut jouer le rôle de retardateur et provoquer la faible résistance à jeune âge. A cause de cette diminution de f_c , il faut être prudent sur chantier. Jusqu'à 1 jour, les f_c du BAP-B avec toutes les combinaisons (même à dosage en VEA élevé), sont supérieures de 8 MPa, ce qui permet de démouler. Cependant, il s'agit d'une résistance insuffisante pour les autres activités. En termes de temps, l'effet des adjuvants sur la résistance à la compression diminue. Jusqu'à 28 et 91 jours, il n'y a plus d'effet sur la compression. La figure 7.10 montre les résistances à la compression à 91 jours pour les différentes combinaisons. Elles sont quasiment identiques (60 MPa) aux résultats observés au chapitre 5, dans la figure 5.10. Cette observation similaire entre le MBE-BAP-B et le BAP-B indique que la méthode MBE peut être utilisée afin de prévoir l'évaluation de la résistance à la compression dans le temps et à dosages en VEA variés.

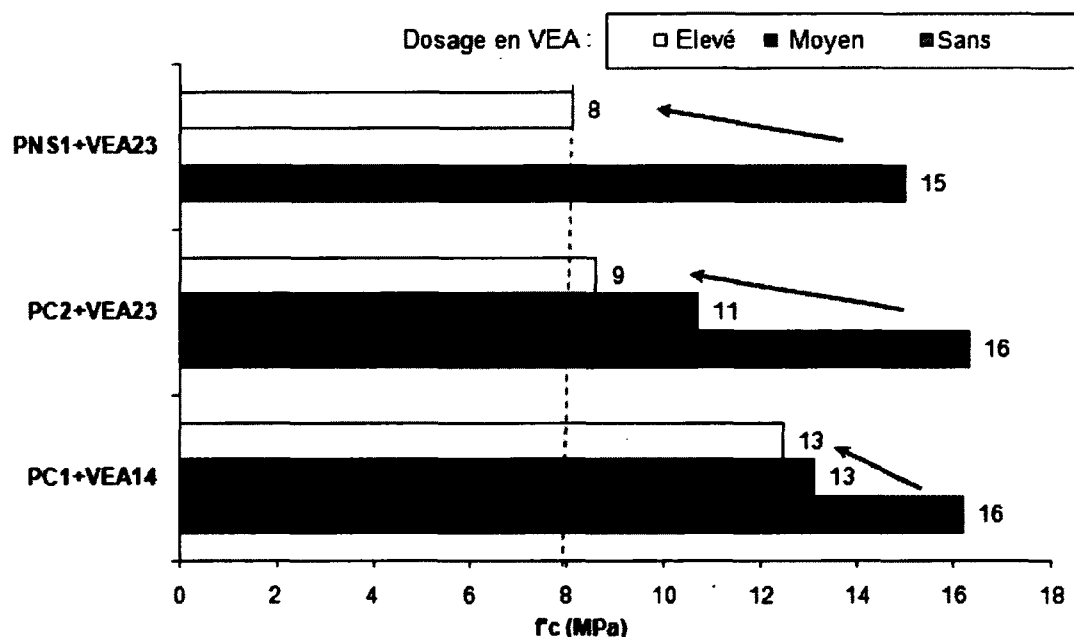


Figure 7.9 : Résistance à la compression à jeune âge (1 jour) pour le BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA (teneur en air < 1 %)

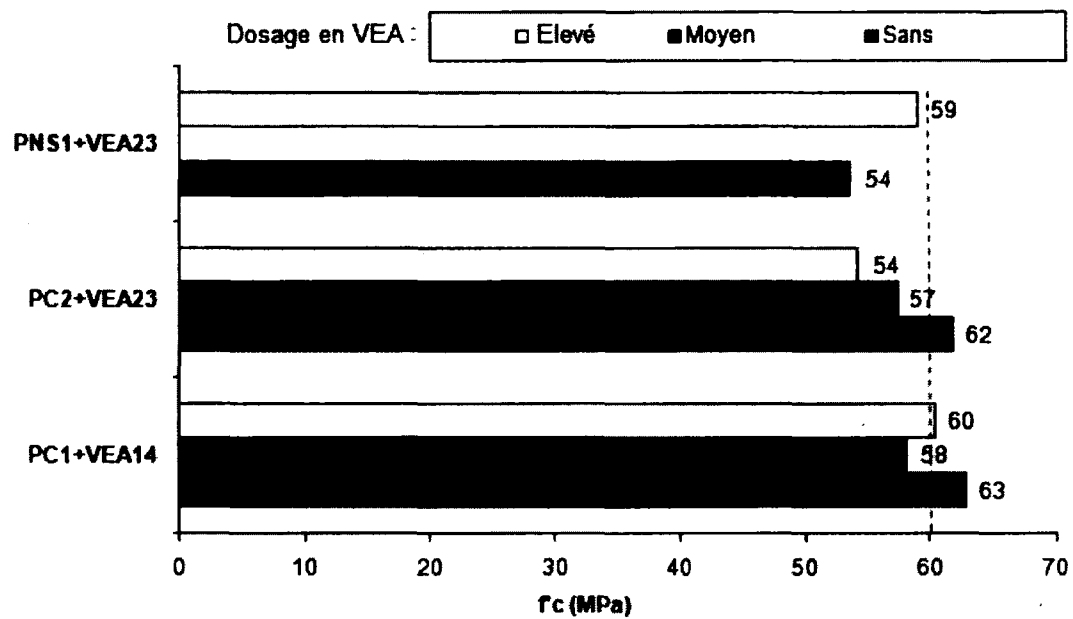


Figure 7.10 : Résistance à la compression à long terme (91 jour) pour le BAP pour la construction des bâtiments avec différentes combinaisons de SP/VEA (teneur en air < 1 %)

7.2 Étude sur le Béton de Masse avec une fluidité identique au BSAP (BSAP-BM)

Deux types de combinaison MR2+VEA14 et PNS2+VEA23 ont été utilisées dans le BSAP-BM. Dans cette étude sur le béton, l'AEA et le retardateur ont été ajoutés afin d'identifier un béton ayant une teneur en air stable dans le temps entre 5 % et 8 %. Finalement cinq bétons ont été fabriqués afin d'étudier les propriétés à l'état frais et durci. Le dosage en adjuvant de ces cinq mélanges est présenté dans le tableau 3.17 (chapitre 3). Ce tableau indique que le béton MR2+VEA14 (1) contient moins de VEA et d'AEA que le béton ME2+VEA14 (2). Ainsi, dans la série de béton PNS2+VEA23+Ret, chaque béton contient le même dosage en SP, VEA et AEA, cependant le dosage en retardateur augmente, comme l'indique la note (0), (1) et (2). Les résultats à l'état frais sont présentés dans le tableau 7.1. L'étalement, la teneur en air et la température initiale de tous les bétons sont contrôlés pour atteindre 500 mm, 5-8% et 10°C. Les résultats de colonnes de tassement et de ségrégation sont inférieurs à 0,5 % et 15 % respectivement, ce qui prouvent que tous les bétons employés sont stables.

Tableau 7.1 : Résultats des bétons à l'état frais

		MR2+VEA14 (1)	MR2+VEA14 (2)	PNS2+VEA23 +Ret(0)	PNS2+VEA23 +Ret(1)	PNS2+VEA23 +Ret(2)
Etalement (mm)	10 min	470	515	565	495	485
	30 min	430	500	130*	475	490
	60 min	40*	470	50*	140*	490
Air %	10 min	7	7,8	7,4	7,1	5,5
	60 min	4,3	8,2	2,5	4,8	5,5
Température (°C)	10 min	11	10	11	9	9
	30 min	12	12	13	11	11
	60 min	14	13	14	12	13
Colonne tassement (%)	15 min	0,16	0,31	N/A	0,10	0,24
Colonne ségrégation (%)	60 min	5	6	1	4	9

7.2.1 Perte de la maniabilité

La perte de la maniabilité dans le temps dépend du dosage en adjuvants utilisé dans le mélange. Pour le béton MR2+VEA14 (1), la maniabilité diminue rapidement 30 minutes après le contact eau-ciment. Pour le béton MR2+VEA14 (2), L'augmentation du dosage en VEA (SP), provoque une faible diminution de l'étalement jusqu'à 60 minutes par rapport à l'étalement initial, et donc il y a amélioration des résultats de perte de la maniabilité. Ceci confirme que l'effet du dosage en VEA est identique entre le MBE et le béton. Le même phénomène existe aussi pour l'effet du retardateur. Plus on ajoute de retardateur dans le béton, plus il y aura amélioration de la perte de maniabilité par ce béton, comme indiqué dans la figure 7.11. Jusqu'à 60 minutes, la maniabilité des bétons MR2+VEA14 (1), PNS2 +VEA23+Ret (0) et PNS2 +VEA23+Ret (1) est plus faible, il n'y a plus d'étalement (efficacité faible de la rétention de la maniabilité). Les bétons MR2+VEA14 (2) et PNS2+VEA23+Ret (2) possèdent donc les meilleures rétentions de la maniabilité (efficacité élevée).

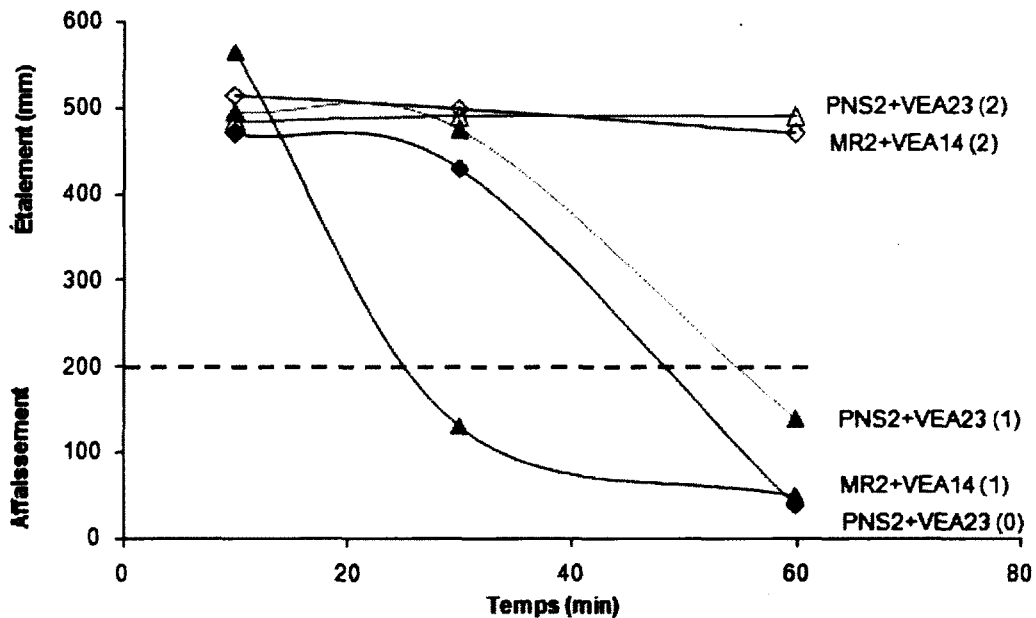


Figure 7.11 : Perte de maniabilité dans le temps pour le BSAP-BM

7.2.2 Perte de la teneur en air

La figure 7.12 démontre que l'augmentation du dosage en VEA et AEA stabilise la teneur en air dans la série de béton MR2+VEA14. L'augmentation du dosage de retardateur diminue la perte de teneur en air dans la série de béton PNS2+VEA23+Ret. En fait, il y a une bonne corrélation entre la perte de maniabilité et la perte de teneur en air jusqu'à 60 minutes après du contact eau-ciment. Pour la teneur en air du béton diminue, plus l'étalement diminue aussi. En conséquence, les bétons MR2+VEA14 (2) et PNS2+VEA23+Ret (2) maintiennent bien la teneur en air (efficacité élevée de la rétention de la teneur en air), alors que le béton PNS2+VEA23+Ret (0) obtient une plus grande diminution de la teneur en air jusqu'à 60 minutes après le contact eau-ciment (efficacité faible).

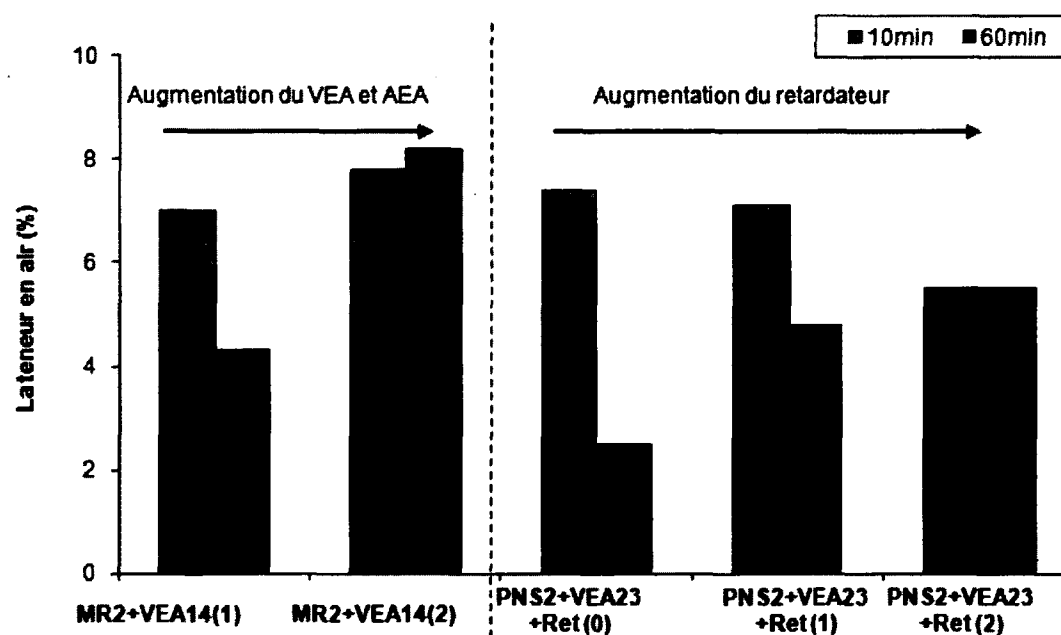


Figure 7.12 : Perte de teneur en air dans le temps pour le BSAP-BM

7.2.3 Dégagement de chaleur

Les dégagements de chaleur jusqu'à 48 heures après le contact eau-ciment pour le BSAP-BM sont présentés dans la figure 7.13. Dans le cas des mélanges sans retardateur, tel que bétons MR2+VEA14 (1), (2) et PNS2+VEA23+Ref (0), leur dégagement de chaleur est similaire (efficacité faible au niveau du dégagement de chaleur). Le béton MR2+VEA14 (2), qui contient plus de VEA, donc un dosage en SP élevé, a un temps de prise légèrement plus long. Le dosage en retardateur provoque évidemment un effet sur le dégagement de chaleur. Plus le dosage en retardateur est élevé, plus le dégagement de chaleur est lent. Le béton PNS2+VEA23+Ret (1) possède une efficacité moyenne au niveau du dégagement de chaleur, alors que le béton PNS2+VEA23+Ret (2) indique une efficacité élevée.

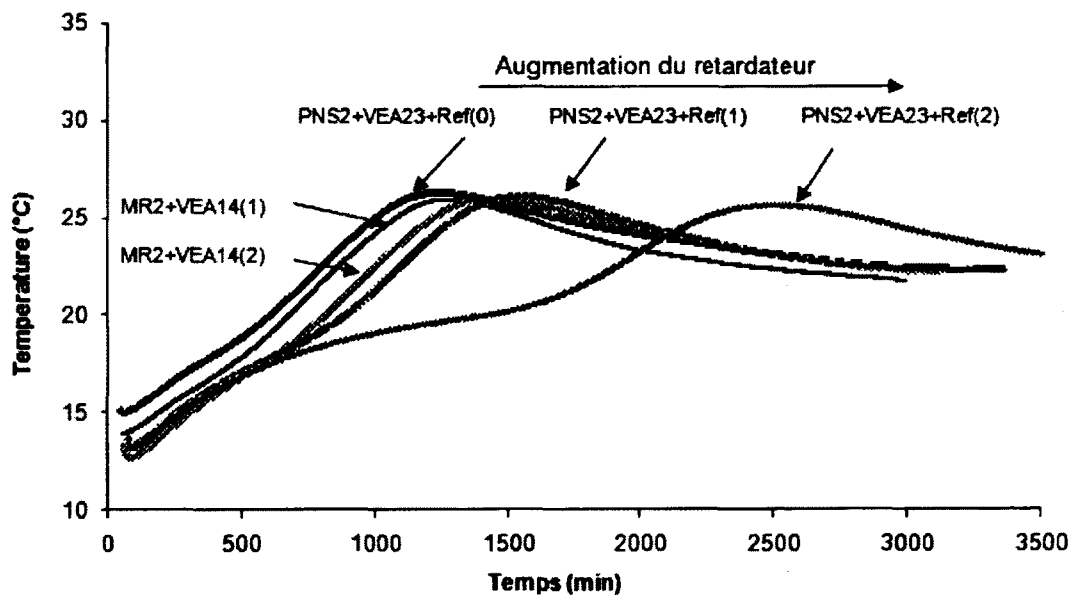


Figure 7.13 : Dégagement de chaleur dans le temps pour le BSAP-BM

7.2.4 Résistance à la compression et module E

La résistance à la compression (f_c) et le module E dépendent de la teneur en air et du dosage en retardateur, présentés sur la figure 7.14. Dans la série du béton MR2+VEA14, en augmentant le dosage en VEA et AEA, le phénomène de perte de la maniabilité s'améliore. En conséquence, la teneur en air finale dans le béton est augmentée, ce qui provoque une réduction de la résistance à la compression et du module E dans le béton MR2+VEA23 (2) (efficacité moyenne sur la f_c). Dans la série du béton PNS2+VEA23+Ref, en augmentant le retardateur, la résistance à jeune âge diminue à cause du retard du temps de prise. La résistance à long terme et le module E déçoivent aussi en raison du fort phénomène de ressuage lorsqu'on augmente le retardateur dans le béton. Par conséquent, le béton PNS2+VEA23+Ret (2) possède la plus efficacité faible sur la f_c et le module E.

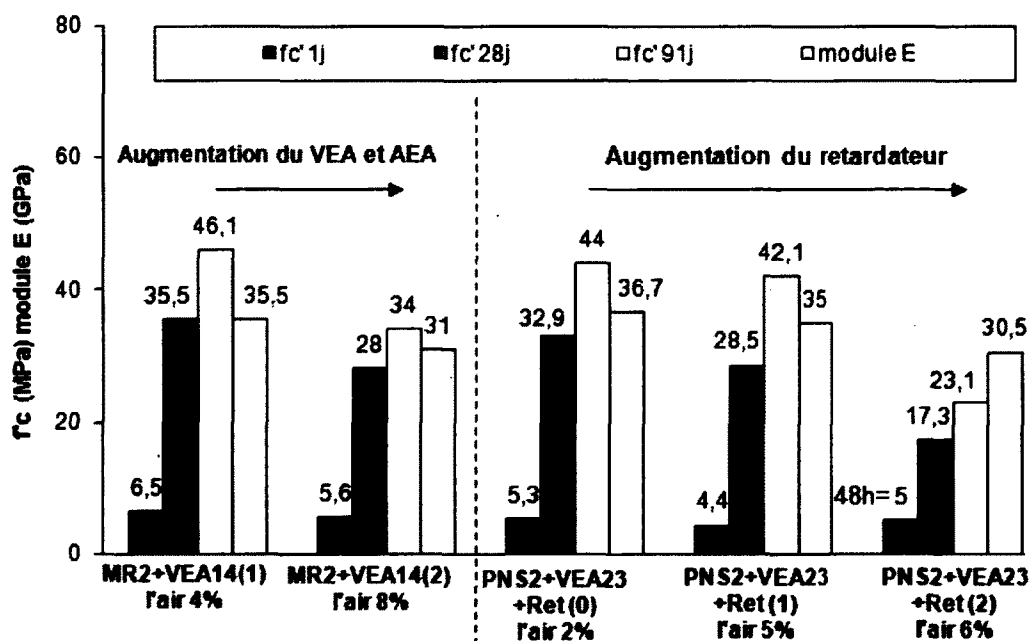


Figure 7.14 : Résistance à la compression et le module E pour le BSAP-BM

7.2.5 Résistance au gel-dégel

Le compte des cycles de gel-dégel commence après 14 jours de mûrissement dans l'eau. Les figures 7.15 et 7.16 présentent respectivement la déformation et l'indice de durabilité pendant la période de gel-dégel du BSAP-BM avec différentes combinaisons d'adjuvant. La limite recommandée pour l'indice de durabilité est 90 % pour le béton de masse. Dans cette étude sur le BSAP-BM avec différentes combinaisons d'adjuvant, la plupart des bétons résistent bien aux cycles de gel-dégel (efficacité élevée sur la résistance au gel/dégel), sauf le béton MR2+VEA14 (1), qui se déforme rapidement après 40 cycles, alors que son indice de durabilité décroît jusqu'à 17 % après 160 cycles.

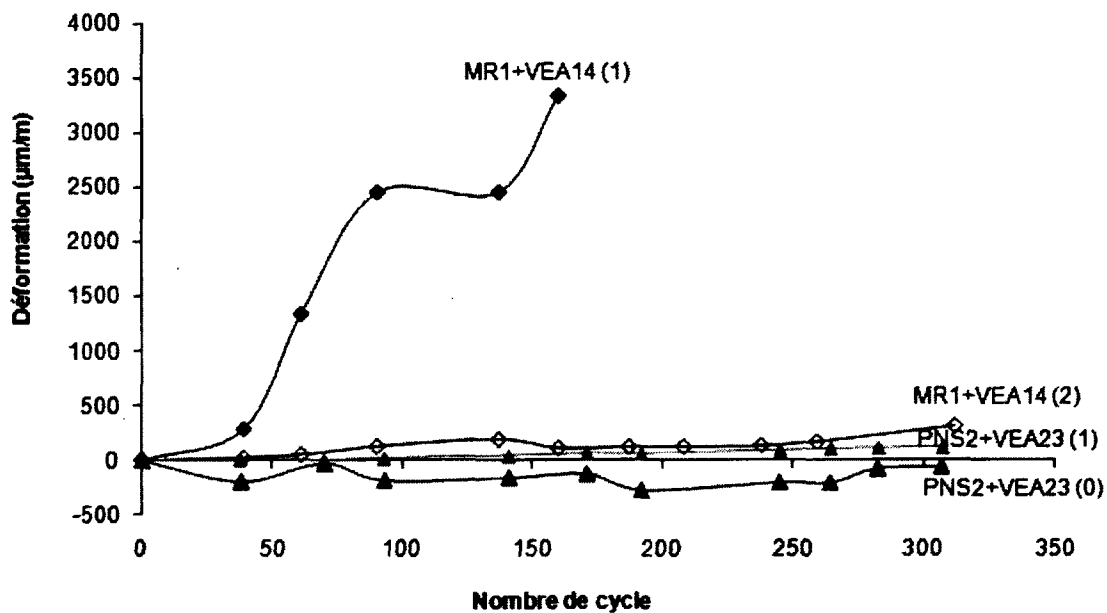


Figure 7.15 : Déformation durant la période de gel-dégel pour le BSAP-BM

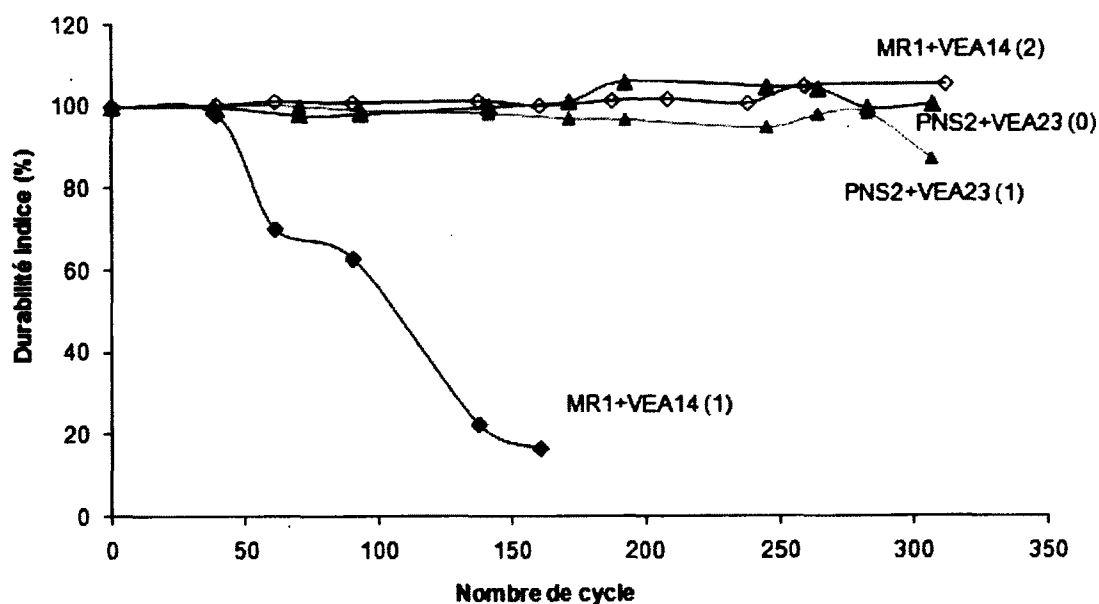


Figure 7.16 : Indice de durabilité durant la période de gel-dégel pour le BSAP-BM

7.2.6 Résistance à l'écaillage

Les échantillons pour la résistance à l'écaillage, qui ont été stockés dans la salle à 100% d'humidité après leur démoulage, ont été mesurés à 28 jours. Les résultats jusqu'à 56 cycles sont présentés dans le tableau 7.2 et sur la figure 7.17. Le phénomène d'écaillage est principalement apparent dans le BSAP-BM qui présente le plus de ressuage. Par exemple, dans le béton MR2+VEA14 (1), qui n'a pas assez de VEA, et PNS2+VEA23+Ref (2), qui a une quantité excessive de retardateur, l'eau et la pâte montent en surface, donc après 56 cycles une grande quantité de résidu se fragmente à la surface de l'échantillon (efficacité faible sur la résistance en écaillage). Par contre, le béton PNS2+VEA23+Ref (0) est légèrement écaillé et perd une petite quantité de masse à la surface (efficacité élevée).

Tableau 7.2 : Résultats obtenus lors de l'essai d'écaillage pour le BSAP-BM

Nb.de cycles	MR2+VEA14 (1)		MR2+VEA14 (2)		PNS2+VEA23+Ret(0)		PNS2+VEA23+Ret(2)	
	Résidu kg/m ²	Code	Résidu kg/m ²	Code	Résidu kg/m ²	Code	Résidu kg/m ²	Code
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
7	2,01	1b	0,52	1b	0,21	1a	0,60	1b
21	4,96	3	1,13	1b	0,27	1a	1,82	2a
35			1,45	1b	0,44	1a	2,04	2b
56			1,92	1b	0,62	1a	2,11	2b

*0 = Aucun écaillage

1 = Très léger (3,2 mm. Max. aucun granulat)

2 = Léger à modérer

3 = Modérer (quelques granulats)

a = léger

b = important

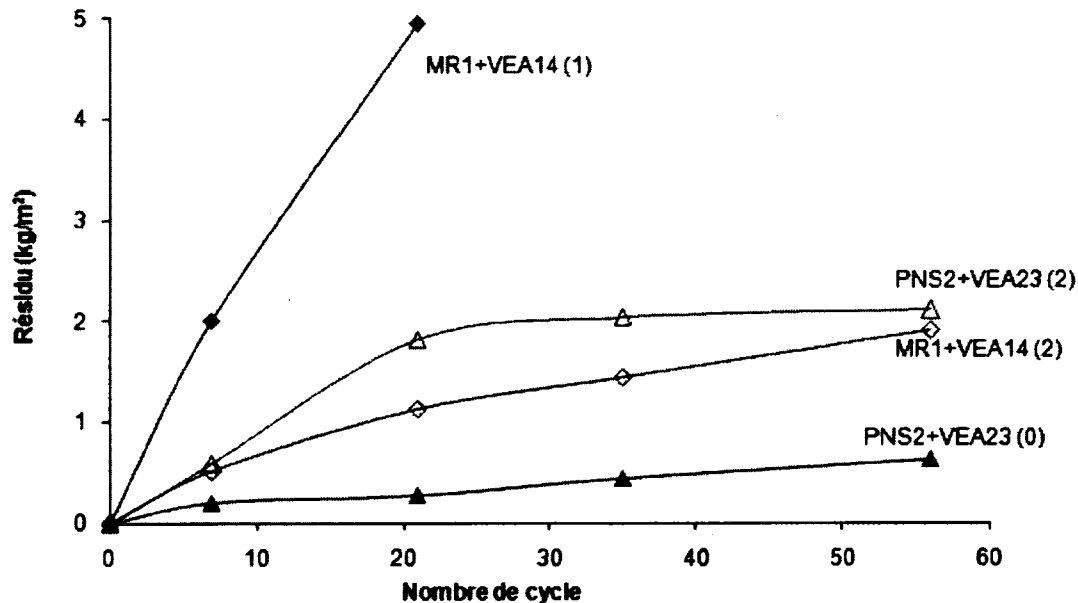


Figure 7.17 : Perte de masse pendant l'essai d'écaillage pour le BSAP-BM

7.2.7 La perméabilité aux ions chlorures

La perméabilité aux ions chlorures (KCL) du BSAP-BM a été testée à 28 jours et à 91 jours après du contact eau-ciment. La figure 7.18 démontre que la perméabilité aux ions chlorures du BSAP-BM diminue dans le temps. A 28 jours, la perméabilité est élevée (entre 4000 et 6000 coulombs). Puis à 91 jours, elle est moyenne (entre 2000 et 4000 coulombs). Cette diminution de la perméabilité résulte de l'hydratation du ciment dans le temps. Les différentes combinaisons d'adjuvant provoquent aussi des variations de la perméabilité. Cette variation est liée directement à la compacité de l'échantillon et au système d'air. Le béton qui contient le plus de bulles d'air (MR2+VEA14 (2)), possède une perméabilité plus élevée. Le béton avec PNS2+VEA23+Ref (0) qui perd trop de maniabilité, possède une perméabilité importante aussi. Les perméabilités aux ions chlorures à 91 jours de tous ces cinq bétons sont inférieures de 4000 coulombs, des valeurs acceptables pour le BSAP-BM.

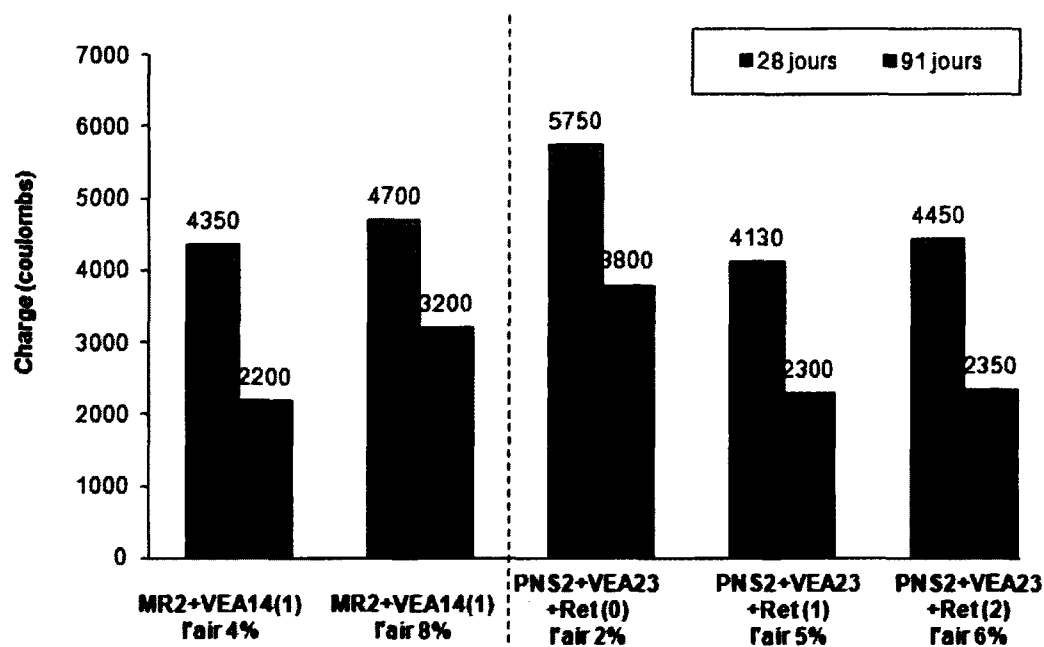


Figure 7.18 : Perméabilité aux ions chlorures à 28 jours et 91 jours pour le BSAP-BM

7.2.8 Retrait au séchage

L'échantillon de retrait au séchage est démoulé 1 jour après le contact eau-ciment, avait d'être mûri pendant 7 jours dans l'eau. La première mesure commence 7 jours après qu'il ait été retiré de l'eau. La figure 7.19 présente les résultats du retrait au séchage pour le BSAP-BM avec différentes combinaisons d'adjuvants jusqu'à une mesure stable. Tous les retraits au séchage sont acceptables, entre 200 et 1000 $\mu\text{m/m}$. Lorsqu'on compare les bétons MR2+VEA14 (1) et (2), on voit que le changement de dosage en VEA n'a aucun effet sur le retrait au séchage. Pour la série de bétons PNS2+VEA23+Ret, un faible dosage en retardateur ne change pas le retrait au séchage. Mais un dosage en retardateur élevé peut augmenter le retrait au séchage à cause de l'apparition du phénomène le ressuage. Par ailleurs, la différente combinaison d'adjuvant SP/VEA/AEA peut aussi faire varier le retrait au séchage. Les retraits aux séchages de MR2+VEA14 sont de 550 $\mu\text{m/m}$. Ils sont légèrement plus élevé que ceux du PNS2+VEA23+Ref (0) et (1) (450 $\mu\text{m/m}$). Et la combinaison contenant le plus de retardateur, PNS2+VEA23+Ref(2), possède le plus grand retrait au séchage (700 $\mu\text{m/m}$).

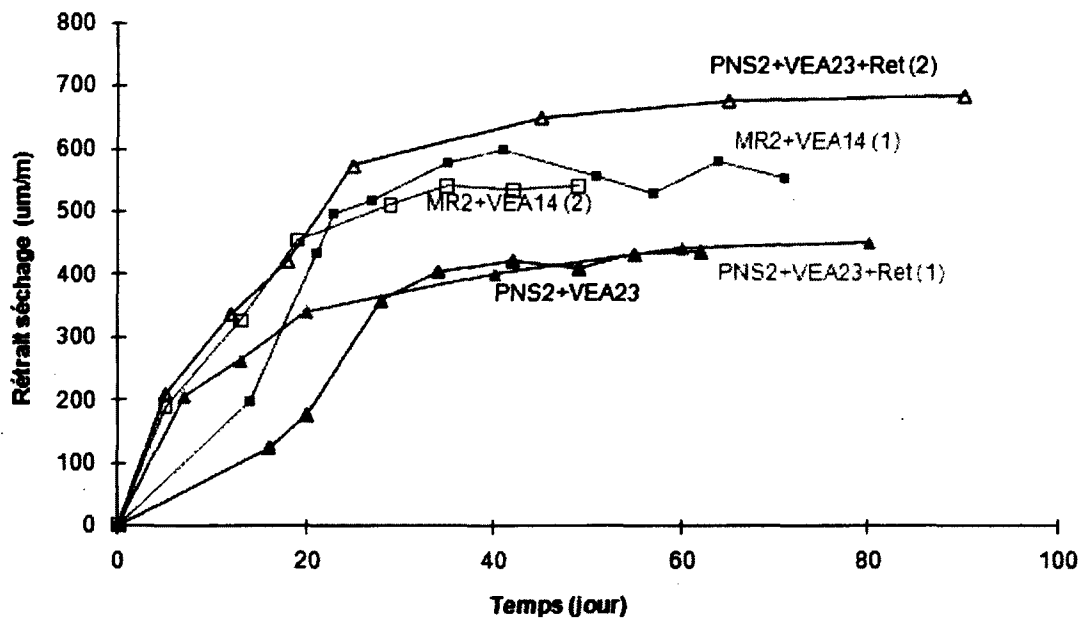


Figure 7.19 : Retrait au séchage pour le BSAP-BM

7.3 Conclusion

L'influence des différentes combinaisons d'adjuvant est vérifiée dans les 2 types de béton (BAP-B et BSAP-BM). Les tableaux 7.3 et 7.4 concluent le comportement de la fluidité, des propriétés rhéologiques et des propriétés mécaniques du béton.

- Le dosage en SP employé dans le MBE-BAP-B peut être utilisé directement dans le BAP-B correspondant afin d'obtenir un étalement initial donné.
- L'ajout de VEA s'avère nécessaire afin d'établir un équilibre entre la maniabilité et la stabilité du béton. Pour la même fluidité, plus le dosage en VEA augmente, plus le béton est stable.
- L'effet du dosage en adjuvant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton et de ses MBE correspondant. Un phénomène existant dans le MBE peut se trouver dans son béton correspondant.
- Il y a une corrélation entre la perte de maniabilité et la perte d'air entre 10 et 60 minutes dans BSAP-BM.
- Le contrôle de la teneur en air dans le BSAP-BM avec PNS est plus facile que celui avec PC.
- L'ajout du retardateur peut améliorer la rétention de maniabilité, stabiliser l'air et ralentir le dégagement de chaleur à l'état frais. Mais il provoque le phénomène du ressuage qui amène alors des problèmes de durabilité.

Tableau 7.3 : Classements de l'effet des différentes combinaisons d'adjuvant pour le BAP-B

BAP-B	PC1+VEA14	PC2+VEA23	PNS1+VEA23
Demande en SP	II	II	I
Amélioration de la stabilité	I	I	II
Résistance à la compression à jeune âge	I	I	II

Tableau 7.4 : Classements de l'effet des différentes combinaisons pour le BSAP-BM.

	MR2+ VEA14 (1)	MR2+ VEA14 (2)	PNS2+VEA23 +Ret(0)	PNS2+VEA23 +Ret(1)	PNS2+VEA23 +Ret(2)
Perte de maniabilité	III	I	III	III	I
Perte d'air	II	I	III	II	I
Dégagement de chaleur	III	III	III	II	I
Résistance à la compression	I	III	I	I	III
Module E	I	III	II	I	III
Gel-dégel	III	I	I	I	N/A
Écaillage	III	I	I	N/A	III

I : Efficacité élevée

II : Efficacité moyenne

III : Efficacité faible

CHAPITRE 8

Conclusion

L'influence des différents adjuvants sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée a été évaluée vis-à-vis des propriétés rhéologiques à l'état frais et du développement des propriétés mécaniques. Ces propriétés rhéologiques et mécaniques sont étudiées sur les mortiers de béton équivalent, puisqu'elles facilitent la comparaison des effets des adjuvants. Par la suite, ces propriétés sont vérifiées par quelques validations sur béton.

Les études réalisées au cours de ce projet sont combinées en quatre parties. L'objectif de la première partie est d'étudier la performance des SP dans les MBE de béton fluide à rhéologie adaptée. Les résultats des trois types de mortier (MBE-BAP-B, MBE-BAP-P et MBE-BSAP) montrent que :

- Tous les SP peuvent augmenter l'étalement donc la maniabilité du béton fluide. Environ 0,01 % de SP peut provoquer 10 Pa de la diminution du seuil de cisaillement. Le PNS a montré une efficacité moins élevée que les PC afin d'atteindre la même fluidité. Parmi les PC employés, l'efficacité est similaire sauf pour le PC5. Le SP provoque une diminution sur la viscosité plastique, mais cette diminution est 10 fois plus petite que celle du seuil.
- Pour la même maniabilité, les seuils de cisaillement de MBE sont similaires mais il y a une grande différence de viscosité dans les mélanges correspondants, ce qui explique l'utilisation de différents types de SP pour diverses applications. PC2 et PNS sont recommandés pour les applications où une faible viscosité désirée, alors que PC5 et PC7 sont considérés pour éviter le risque de ségrégation.
- La perte de maniabilité jusqu'à 60 min dépend grandement du type de SP. Elle est plus grande pour les mélanges avec PNS et avec PC4. Au contraire, le PC5 donne la meilleure rétention de maniabilité dans les mélanges cimentaires.
- L'utilisation de PC2 et PC6 produit une résistance à jeune âge 40 % plus grande que les autres PC. A long terme, il n'y a pas d'effet significatif des SP sur la résistance à la compression.

L'objectif de la deuxième partie est d'étudier la compatibilité des combinaisons SP /VEA dans les MBE de béton fluide à rhéologie adaptée. Les résultats des 3 types de mortiers (MBE-BAP-B, MBE-BAP-P et MBE-BSAP-BM) montrent que :

- L'augmentation de la demande en SP pour la même augmentation de dosage en VEA dépend du type de SP employé. Elle est quasiment similaire avec les combinaisons PC/VEA. Cependant, l'augmentation de la demande en PNS est plus grande que celle en PC, donc moins économique.
- Pour une maniabilité donnée, l'augmentation du dosage pour tous les types de VEA employés provoque un accroissement de la viscosité plastique. Mais cet accroissement dépend aussi du type de la combinaison de SP/VEA. Le plus grand accroissement est PNS1/VEA23 (170 %) et PC1/VEA14 (50 %) pour le MBE-BAP-B, et PC3/VEA23 (100 %) pour le MBE-BAP-P.
- L'augmentation de dosage en VEA (et SP) résulte en général une amélioration de la maniabilité.
- La résistance à la compression à jeune âge diminue dans le cas d'une augmentation du VEA. Cette diminution de la résistance dépend du type de combinaison et de la composition du mélange. Pour le MBE-BAP-B, la résistance à la compression (f_c) à 1 jour peut varier entre 7 et 22 MPa selon les différents dosages d'adjuvant, sauf pour les combinaisons PC4/VEA14 et PC8/VEA35. PC2/VEA23 réduit de 66 % la f_c en haut dosage en VEA par rapport à la f_c initiale. Pour le MBE-BAP-P qui contient moins de liant, la variation de f_c à jeune âge est plus petite selon les différents dosages d'adjuvant, PC2/VEA23 réduit de 40 % la f_c par rapport à la f_c initiale pour le dosage en VEA élevé. La combinaison de SP/VEA et le dosage d'adjuvant n'ont pas d'effet sur la résistance à long terme.
- Le test de ressuage forcé n'est pas suffisant pour analyser la stabilité des mélanges cimentaires avec la plupart des combinaisons PC/VEA. Par contre, la mesure de conductivité des mélanges cimentaires est une bonne méthode pour déterminer la stabilité.
- Un haut dosage en VEA dans le MBE-BSAP-BM est nécessaire pour obtenir une bonne stabilité, sauf pour le mélange avec PC5 qui n'a pas besoin de VEA incorporé. Pour une même fluidité, la stabilité (sédimentation et ressuage statique) peut être améliorée quand le dosage en VEA augmente, tout dépendant du type de combinaison. PC1+VEA14 ne peut être utilisé dans le MBE-BSAP-BM, car elle ne donne jamais un mélange cimentaire stable.

L'objectif de la troisième partie est d'étudier la compatibilité des combinaisons de SP/AEA dans les MBE de béton fluide à rhéologie adaptée. Les résultats des deux types de mortier (MBE-BSAP et MBE-BMF) montrent que :

- L'entraînement d'air est plus facile avec les MBE plus fluides (MBE-BSAP > MBE-BMF).
- Il existe un point de saturation de la teneur en air pour un mortier combiné SP/AEA. Ce point de saturation dépend de la combinaison employée dans le mélange cimentaire ainsi que du type de composition. Le MR2 et l'AEA14 sont incompatibles : la combinaison des deux en dosage très faible donne directement la teneur en air au point de saturation dans le MBE.
- L'ajout d'AEA à différents dosages dans le MBE avec un dosage constant en SP, peut influencer les propriétés rhéologiques. Généralement, l'augmentation de la teneur en air réduit l'étalement et augmente le seuil de cisaillement, tandis que l'effet sur la viscosité plastique est faible.
- L'ajout d'AEA ne peut pas améliorer la rétention d'ouvrabilité. Par ailleurs, la perte d'air dans le temps dépend du type de combinaison et du dosage employé dans le mélange. La combinaison MR1+AEA 23, en haut dosage d'AEA, montre une augmentation de la teneur en air dans le temps. Contrairement à la combinaison PNS2+VEA 23, une perte d'air est observée lors d'un faible dosage en AEA dans le mélange.
- L'influence du SP/AEA sur la résistance à la compression est totalement déterminée par la teneur en air. Plus la teneur en air est grande, plus la résistance à la compression est petite. Une corrélation linéaire est observée.

L'objectif de la quatrième partie est de valider les effets d'adjuvants sur les bétons. Les résultats des combinaisons SP/VEA sur le BAP-B et les combinaisons SP/VEA/AEA/Retardateur sur le BSAP-BM montrent que :

- Le dosage en adjuvant employé dans le MBE peut être utilisé directement dans le béton correspondant pour obtenir l'étalement initial désiré.
- L'ajout de VEA s'avère nécessaire afin d'établir un équilibre entre la fluidité et la stabilité du BAP. Pour la même fluidité, plus le dosage en VEA augmente, plus le béton est stable.

- Les propriétés rhéologiques à l'état frais et les propriétés mécaniques pour le béton fluide et son MBE ont été corrélées. Le phénomène qui existe dans les MBE, peut se trouver dans son béton correspondant.
- Il y a une corrélation entre la perte de maniabilité et la perte d'air entre 10 et 60 min dans BSAP-BM. Par ailleurs, comme il a été montré par le MBE, la perte d'air du béton dans le temps dépend du type de combinaison et du dosage employé dans le mélange. La combinaison MR2+AEA 14 montre que la teneur en air quasiment constante dans le temps. Contrairement à la combinaison PNS2+VEA 23, on observe une perte d'air lors d'un faible dosage en AEA dans le mélange.
- Il est plus facile de contrôler l'entraînement d'air dans le BSAP-BM avec PNS que dans celui avec PC. En plus de l'incompatibilité de MR2+VEA14 qui existe dans le MBE, le changement du dosage en VEA dans le BSAP-BM influence ainsi le dosage en AEA 14 pour la teneur en air désirée. Cette variation sensible provoque une difficulté à contrôler la teneur en air sur le chantier.
- L'ajout du retardateur peut améliorer la rétention de maniabilité, stabiliser l'air et ralentir le dégagement de la chaleur à l'état frais. Mais il provoque alors le phénomène du ressuage ce qui conduit à des problèmes de durabilité.
- Un haut dosage en VEA est nécessaire pour le BSAP-BM, afin d'éliminer le ressuage et un le problème de stabilité à l'état frais, et éviter des problèmes de durabilité (gel-dégel, écaillage).

Liste des références

- Aitcin, P., Jiang, S., Kim, B., Nkinamubanzi, P. et Petrov, N. (2001). Cement/superplasticizer interaction : The case of polysulfonates; L'interaction ciment/superplastifiant: Cas des polysulfonates. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees*, numéro 233, p. 87-98 et 109-114.
- Anonyme (1984). Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology. Dans Ramachandran, V. S., Noyes Publ, Park Ridge, NJ, USA,
- Axim (2008). AximInfos *Spécial Adjuvants*. P. 6
- Banfill P. (2003). The rheology of fresh cement and concrete – a review. In: 11th international cement chemistry congress. Durban;
- Beaupre, D., Mindess, S. et Pigeon, M. (1994). Rheology of fresh shotcrete. p. 225.
- Bedard, C. et Mailvaganam, N. P. (2006). The use of chemical admixtures in concrete. Part II: Admixture-admixture compatibility and practical problems. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, volume 20, numéro 1, p. 2-5.
- Cordon, W.A. (1946). Entrained Air—A Factor in the Design of Concrete Mixes. *Materials Laboratories Report*, Denver, CO: Bureau of Reclamation, Research and Geology Division. numéro C-310
- Coussot, P. (1993) Rhéologie des boues et laves torrentielles études de dispersions et suspensions concentrées, *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et l'étude du CEMAGREF, Série Montagne*, numéro 5, p.418
- Coussot P., Ancey C. (1999) Rhéophysique des pâtes et des suspensions, *EDP Sciences*.
- Courrazé G., Grossiord J.L. (2000). Initiation à la rhéologi , Tec& Doc,
- Du, L. et Folliard, K. J. (2005). Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 35, numéro 8, p. 1463-71.
- Erdem, T.K., Khayat, K.H., and Yahia, A. (2009). Correlating rheology of self-consolidating concrete to corresponding concrete-equivalent mortar. *ACI Materials Journal*, numéro 106(2), p.154–160.
- Felekoglu, B. et Sarikahya, H. (2008). Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 9, p. 1972-1980.
- Ferraris, C.F. et Brower, L.E. (2003) Comparison of concrete rheometers: International tests at MB, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7154, Cleveland OH, USA.

- Flatt, R. J. et Houst, Y. F. (2001). A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 8, p. 1169-1176.
- Friberg, S. (1976). Emulsion stability. In: S. Friberg, Editor, Food emulsions, Marcel Dekker, New York, p. 1-38.
- Gagné, R. GCI 714 - Durabilité et réparations du béton. *Notes de Cours*, p. 143-145.
- Garcia Boivin, S. (1999). Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. *Thèse de doctorat de l'ENPC*. Marne-la-Vallée, France.
- Golaszewski, J., Szwabowski, J. et Soltysik, P. (2005). Influence of air entraining agents on workability of fresh high performance concrete. *International Congress - Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, July 5, 2005 - July 7*. Thomas Telford Services Ltd, Dundee, Scotland, United kingdom, p. 171-182.
- Hallal, A., Kadri, E. H., Ezziane, K., Kadri, A. et Khelafi, H. (2010). Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste. *Construction and Building Materials*, volume 24, numéro 8, p. 1418-1423.
- Hanehara, S. et Yamada, K. (1999). Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. *Cement and Concrete Research*, volume 29, numéro 8, p. 1159-1165.
- Hu, C., de Larrard, F., Sedran, T., Boulay, C., Bosc, F. et Deflorenne, F. (1996). Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 29, numéro 194, p. 620-631.
- Jensen, O. M. et Hansen, P. F. (2001). Water-entrained cement-based materials - I. Principles and theoretical background. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 4, p. 647-654.
- Jiang, S., Kim, B. et Aitcin, P. (1999). Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility. *Cement and Concrete Research*, volume 29, numéro 1, p. 71-78.
- Kosmatka, H. S. et Kerkhoff, B. (2004). dosage et contrôle des mélanges de béton. p. 143.
- Kawai, T. and Okada, T. (1989) Effect of superplasticizer and viscosity-increasing admixture in properties of light-weight aggregate concrete, ACI SP-119, p. 583-604
- Khayat, K. H. (1998). Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - an overview. *Cement and Concrete Composites*, volume 20, numéro 2, p. 171-188.

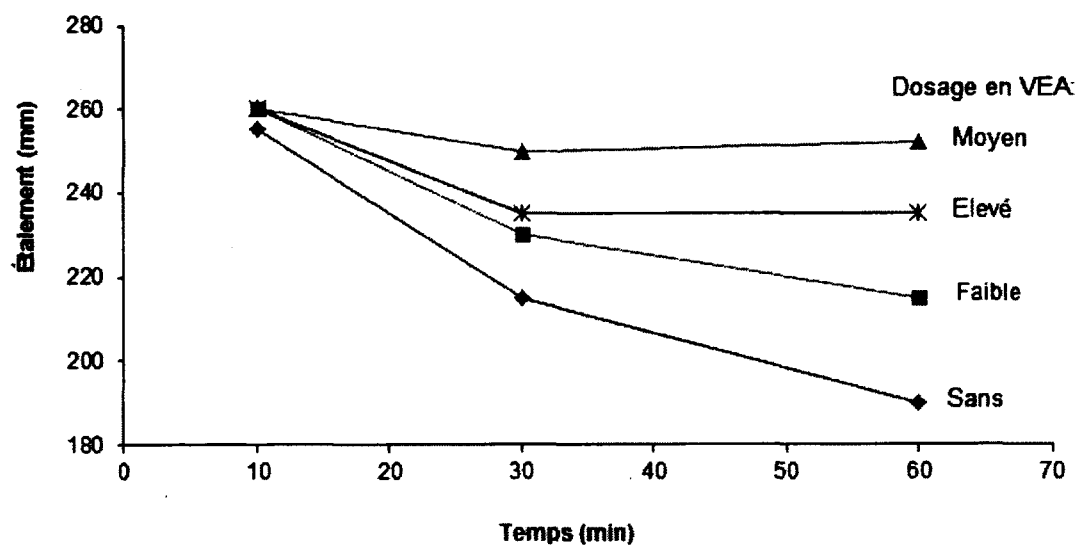
- Kim, B., Jiang, S., Jolicoeur, C. et Aitcin, P. (2000). Adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste. *Cement and Concrete Research*, volume 30, numéro 6, p. 887-893.
- Kim, J. H., Beacraft, M. et Shah, S. P. (2010). Effect of mineral admixtures on formwork pressure of self-consolidating concrete.
- Koehler E.P., Brooks W, Mogan E., and Neuwald A., (2009) Application of rheology, Measurement to Enable and Ensure Concrete Performance. Proceedings of the NRMCA Concrete Technology Forum, Cincinnati, OH.
- Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O. et Abiola, T. O. (2006). Effect of superplasticizer on plastic shrinkage of plain and silica fume cement concretes. *Construction & Building Materials*, volume 20, numéro 9, p. 642-7.
- Mills, R. H. (1966). *Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes*. National Research Council, Washington, DC, United States, p.406-424.
- Minard, H., Garrault, S. et Nonat, A. (2003). The reactivity in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ revisited. volume 28. Elsevier Masson SAS, p. S3-S3.
- Nakajima, Y. et Yamada, K. (2004). The effect of the kind of calcium sulfate in cements on the dispersing ability of poly -naphthalene sulfonate condensate superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 5, p. 839-844.
- Nonat, A. (2003) Hydratation et prise des liants hydrauliques. Partie I et II, Physique, Chimie et Mécanique des Matériaux Cimentaires, Ecole Thématique ATHIL.
- Ouyang, X., Guo, Y. et Qiu, X. (2008). The feasibility of synthetic surfactant as an air entraining agent for the cement matrix. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 8, p. 1774-9.
- Schwartzentruber, A. et Catherine, C. (2000). Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - a new tool to design concrete containing admixture; La methode du mortier de beton equivalent (MBE) - Un nouvel outil d'aide a la formulation des betons adjuvantes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 33, numéro 232, p. 475-482.
- Tattersall, G. H. et Bloomer, S. J. (1979). Further development of the two-point test for workability and extension of its range. *Magazine of Concrete Research*, volume 31, numéro 109, p. 202-10.
- Tattersall, G.H., Banfill, P.F.G. (1983) *The rheology of fresh concrete*, Pitman, London, p.356.
- Topcu, I. B., Bilir, T. et Uygunoglu, T. (2009). Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, volume 23, numéro 5, p. 1947-1953.

Various (1946). Entrained air in concrete. *American Concrete Institute -- Journal*, volume 17, numéro 6, p. 601-694.

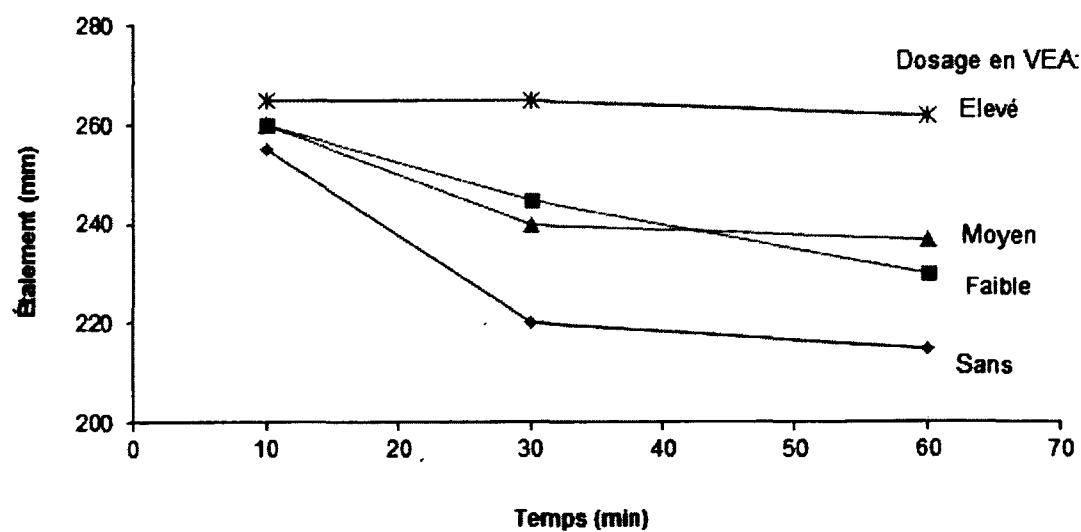
Wallevik O.H. (1990). The Rheology of Fresh Concrete and its Application on Concrete with and without Silica Fume. Dr.ing. thesis, p. 185

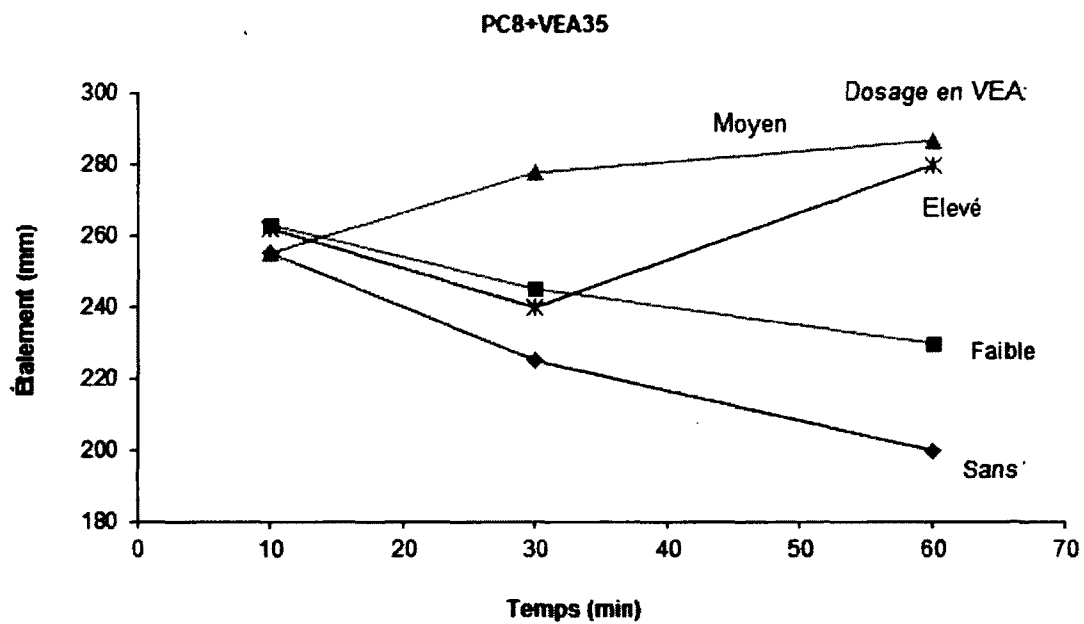
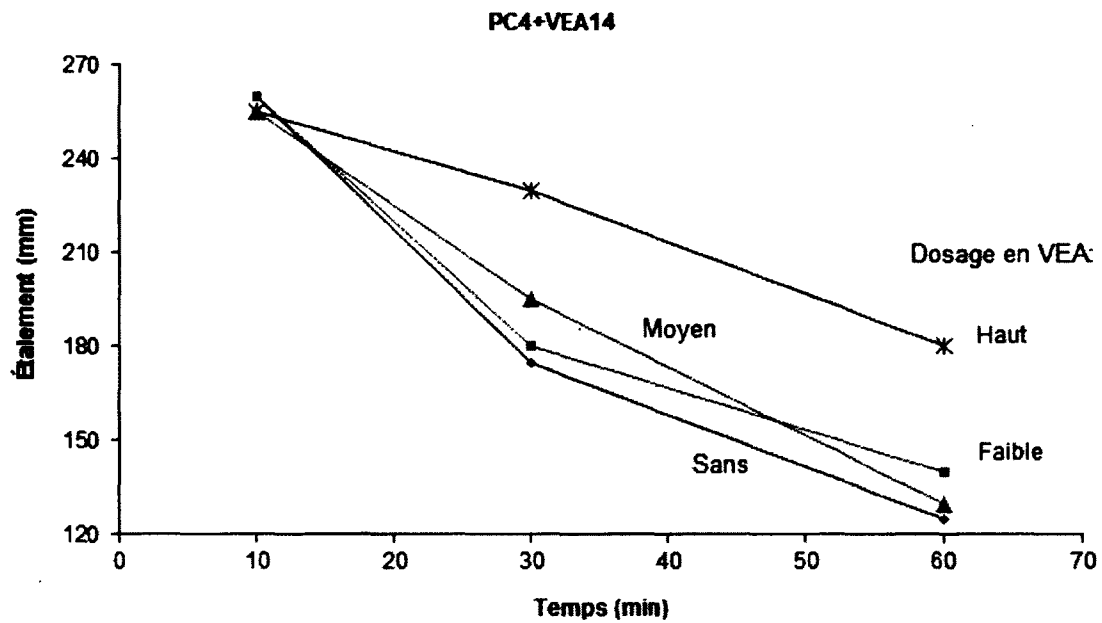
Annexe A

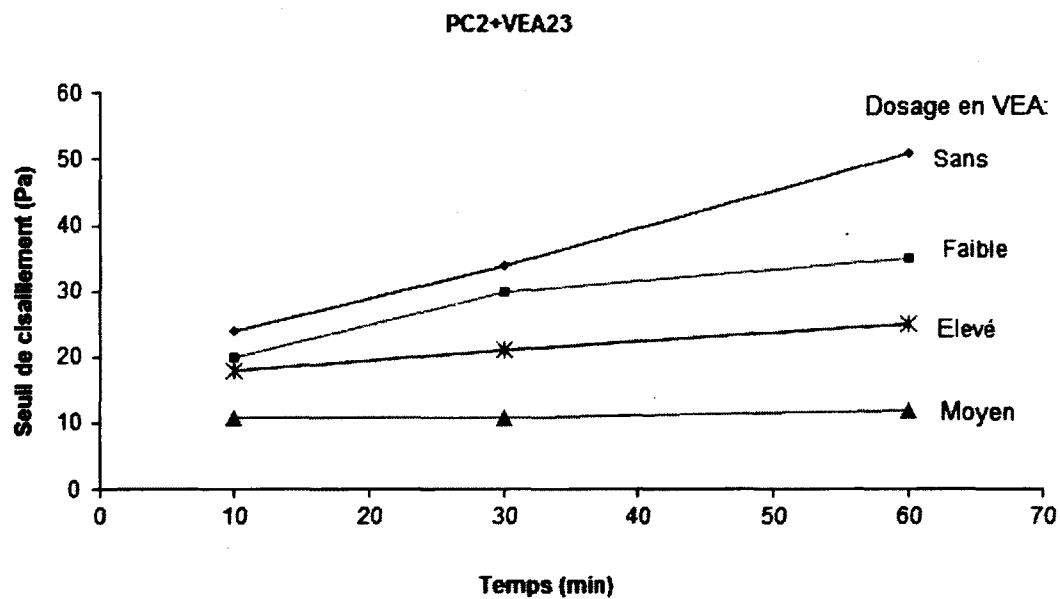
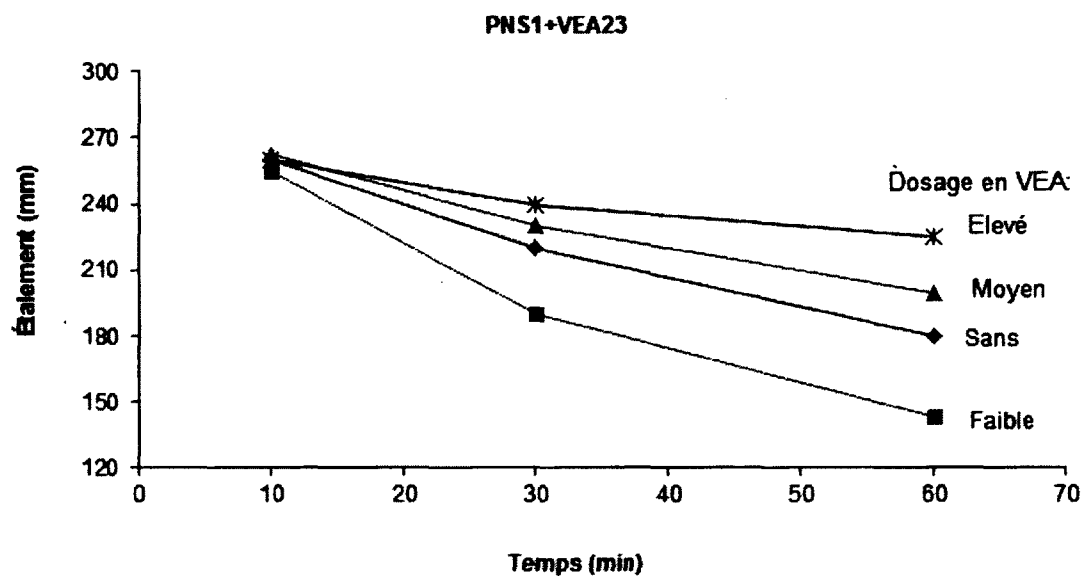
PC2+VEA23



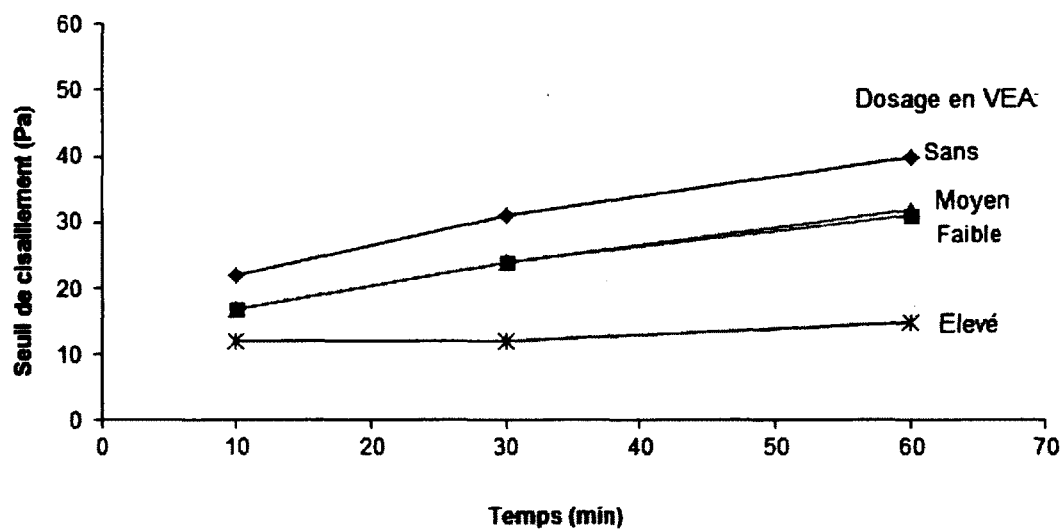
PC3+VEA23



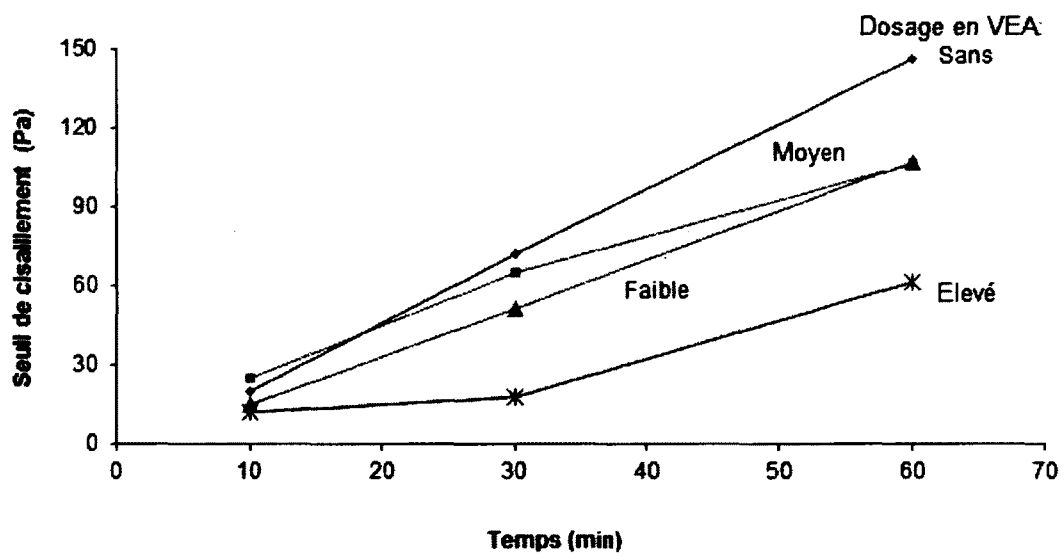




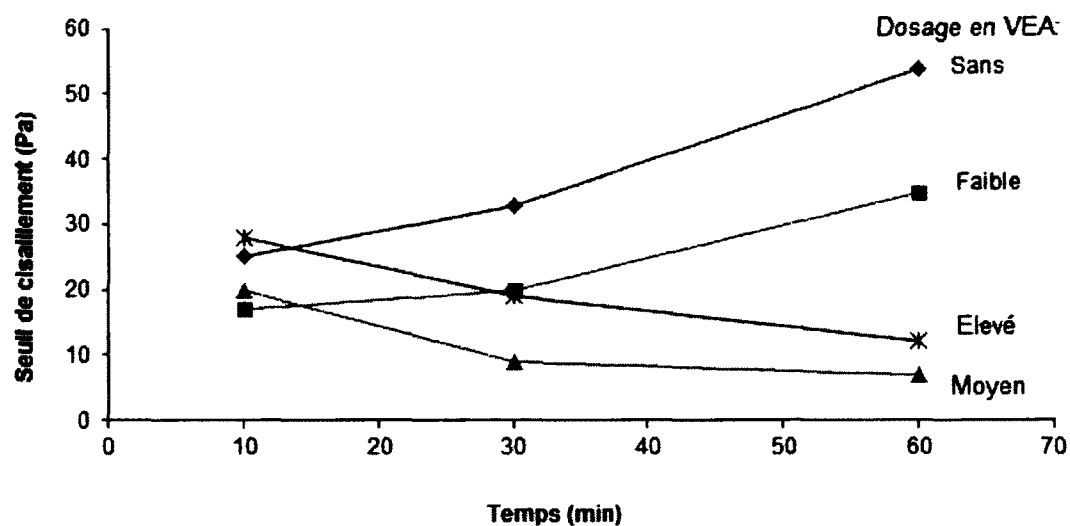
PC3+VEA23



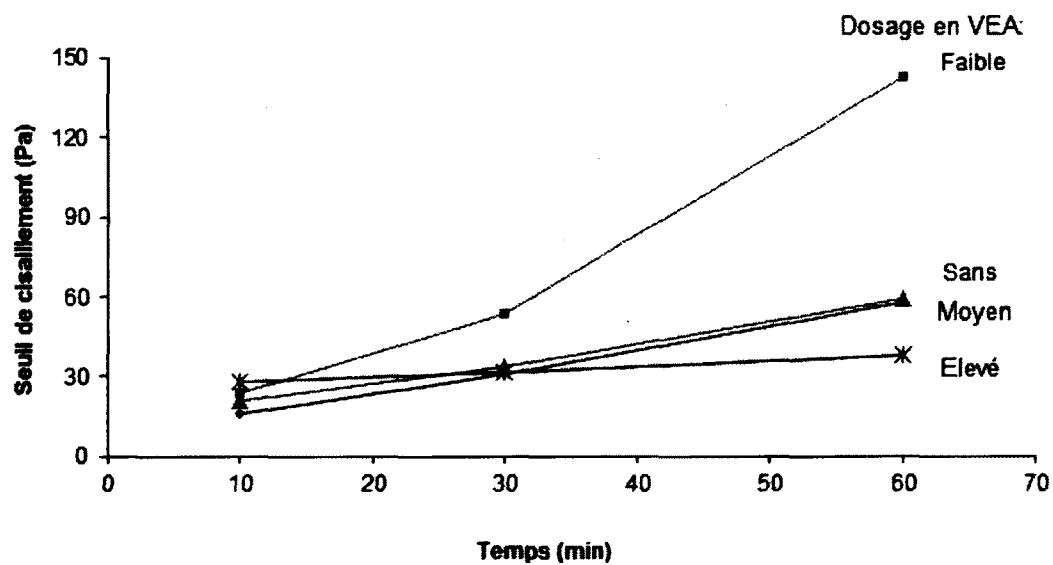
PC4+VEA14

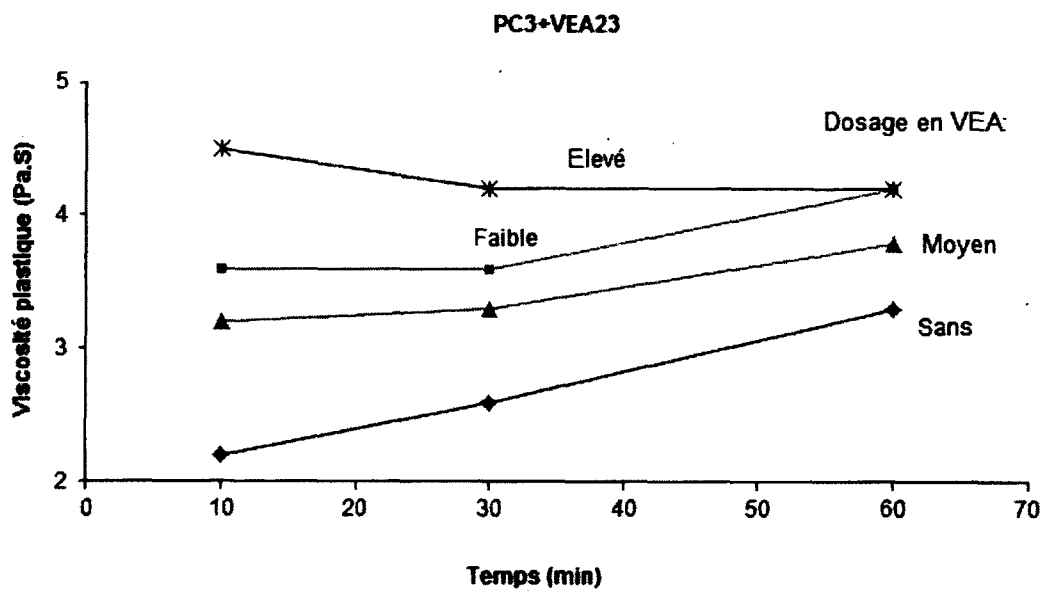
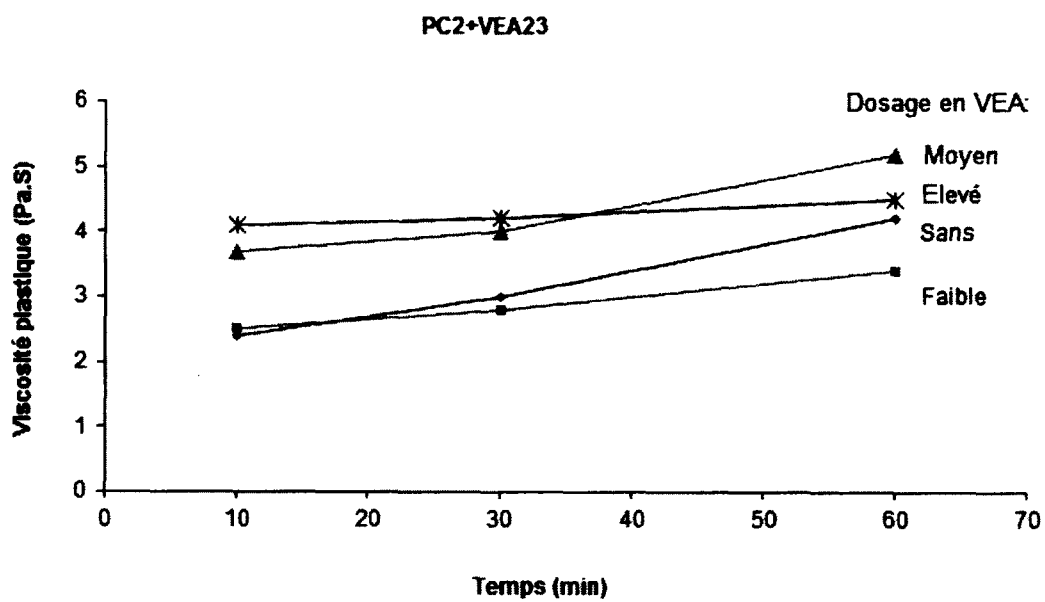


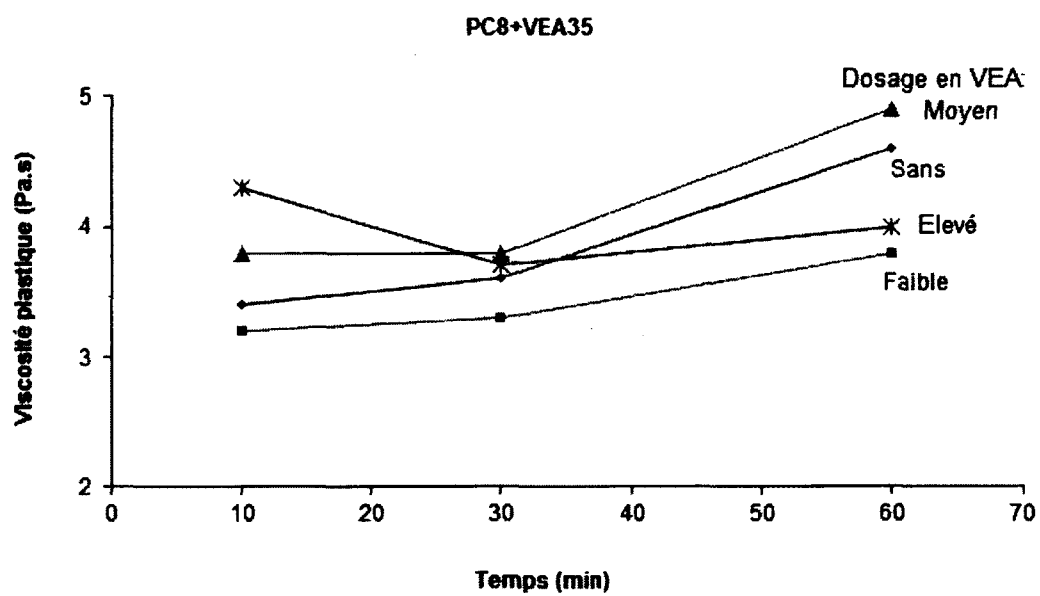
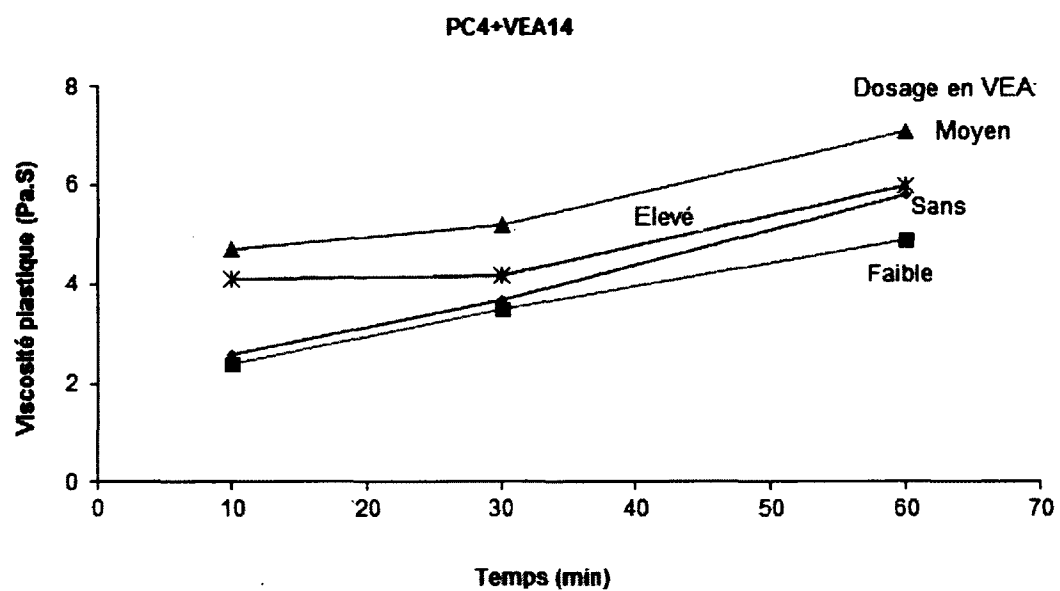
PC8+VEA35



PNS1+VEA23







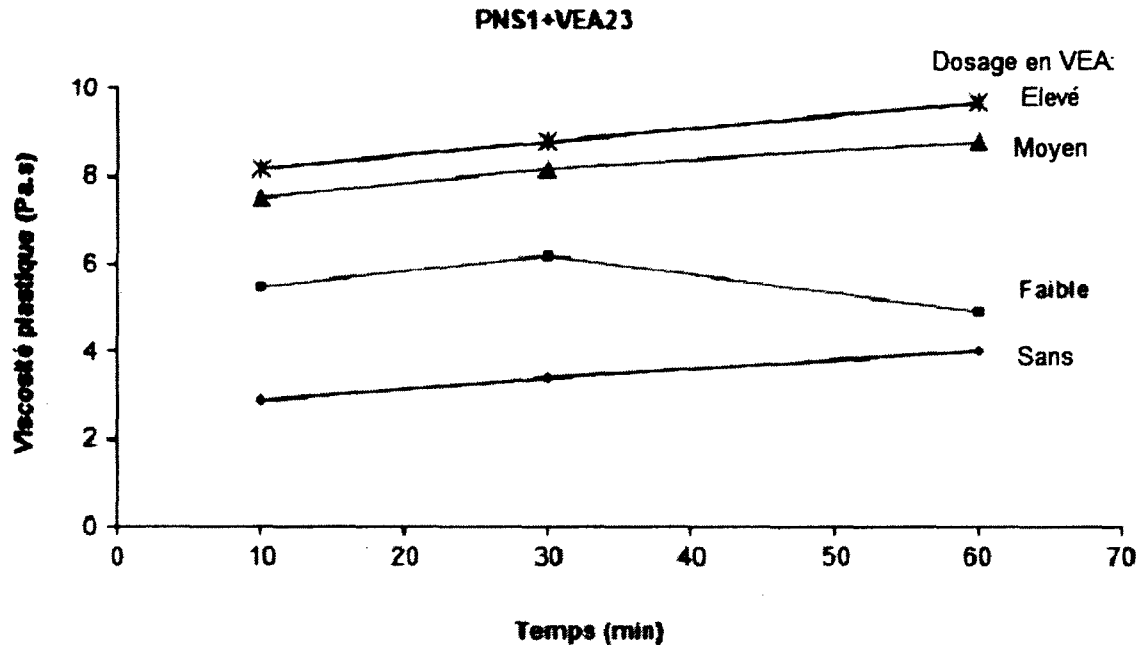
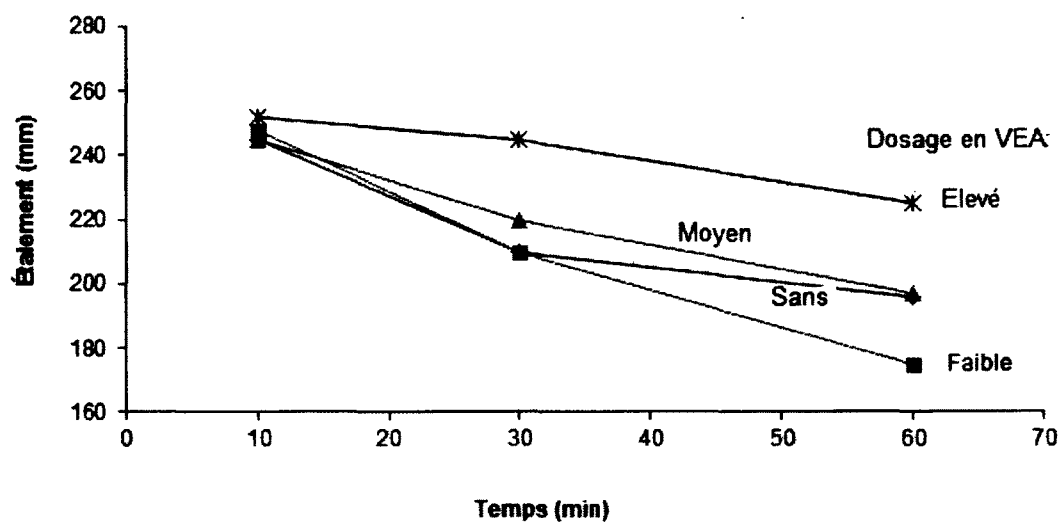
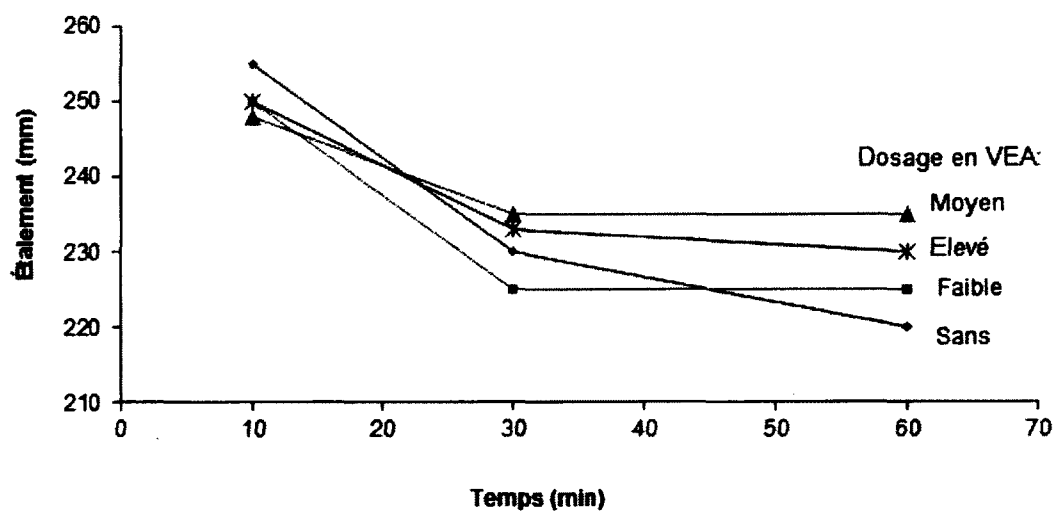


Fig. A.1 – Variation des propriétés rhéologiques (l'étalement, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique) en fonction du temps pour le MBE correspondant au BAP pour la construction des bâtiments (MBE-BAP-B) avec différents dosages en VEA

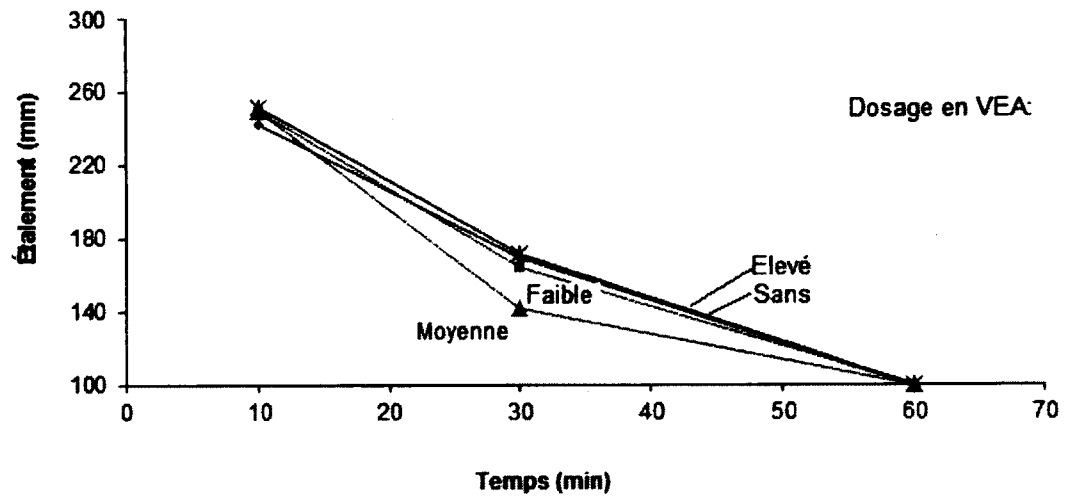
PC2+VEA23



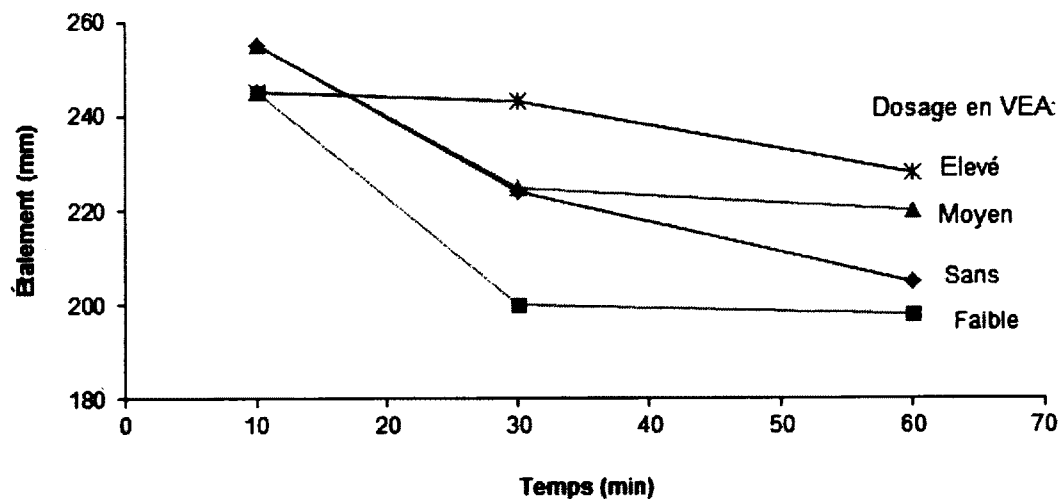
PC3+VEA23



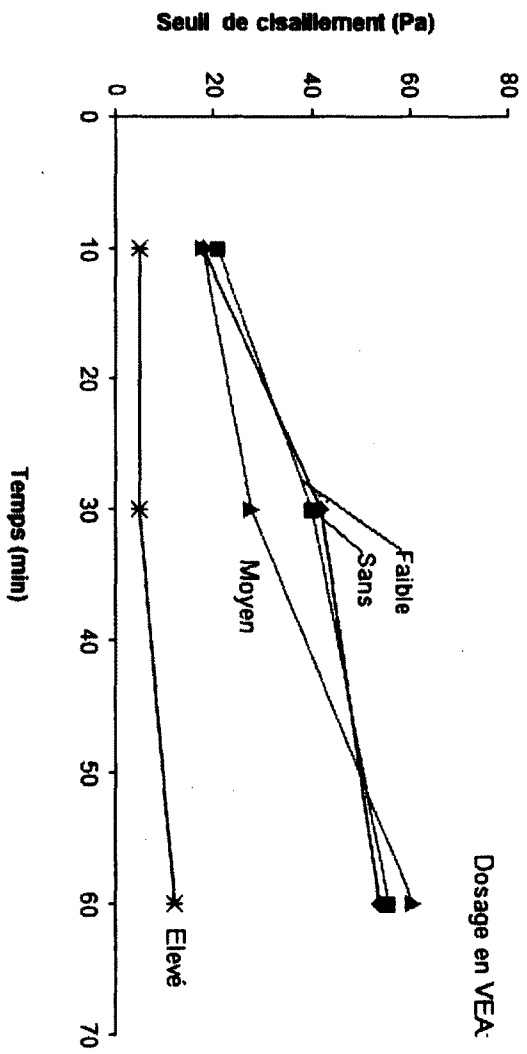
PC4+VEA14



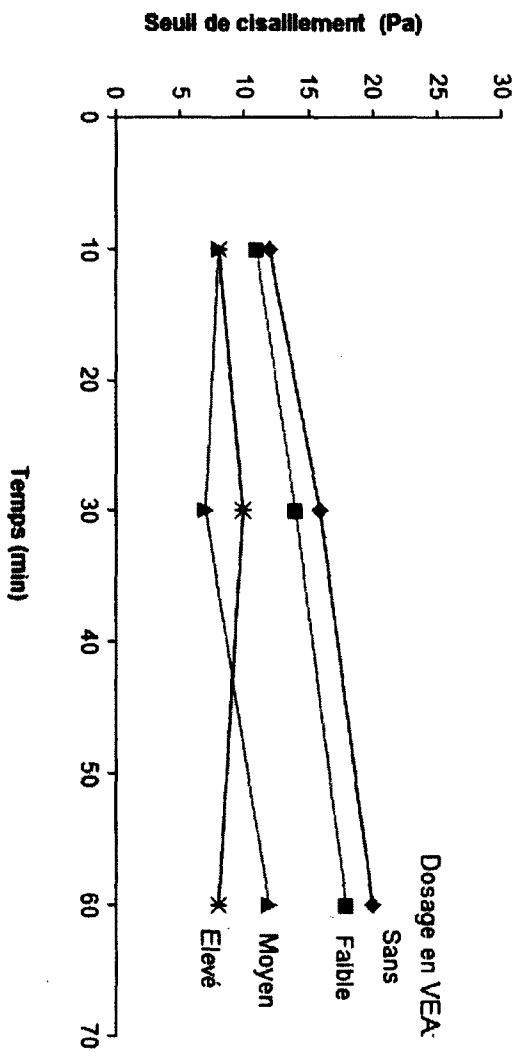
PC7+VEA23

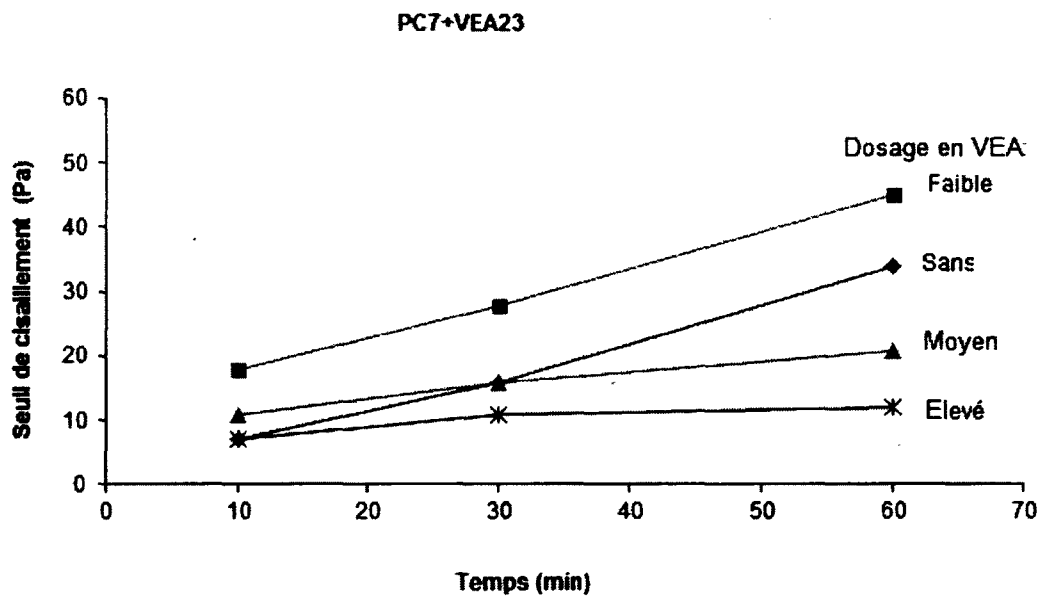
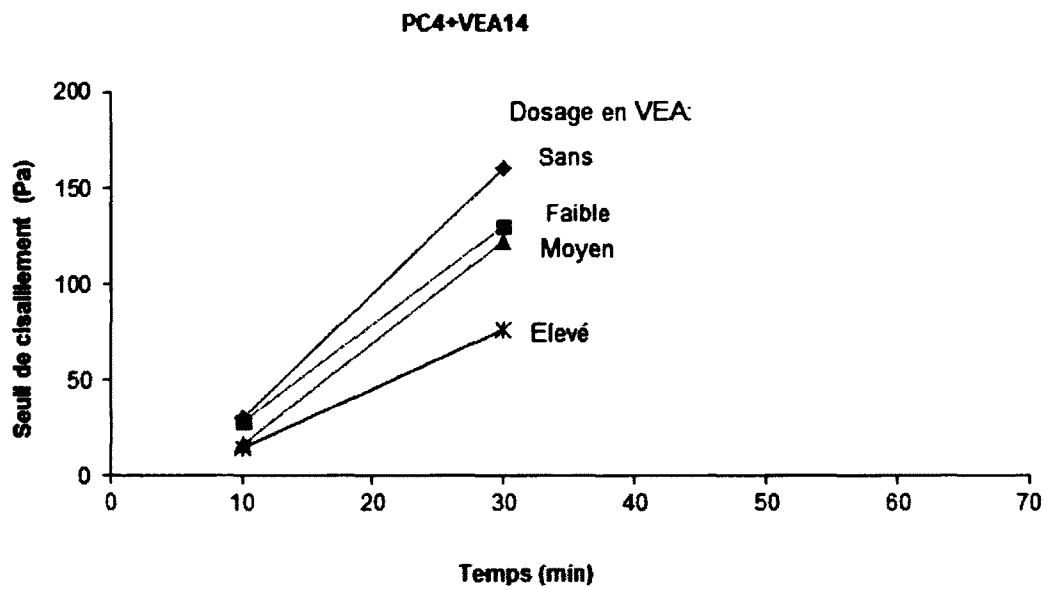


PC2+VEA23

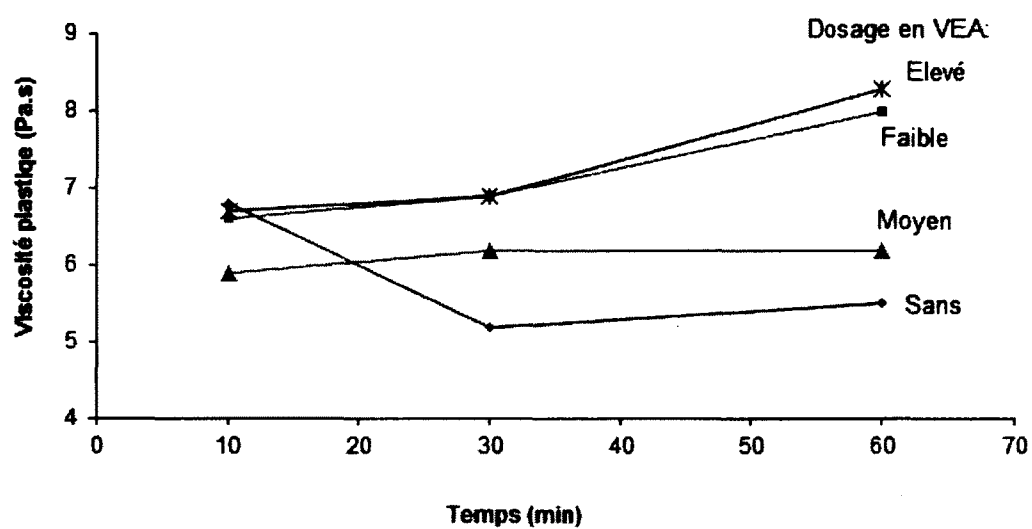


PC3+VEA23

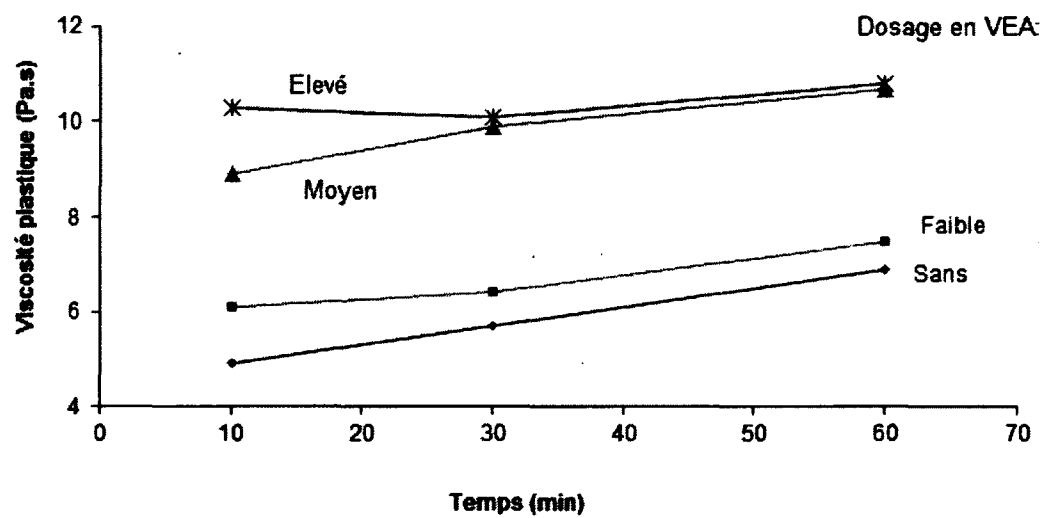




PC2+VEA23



PC3+VEA23



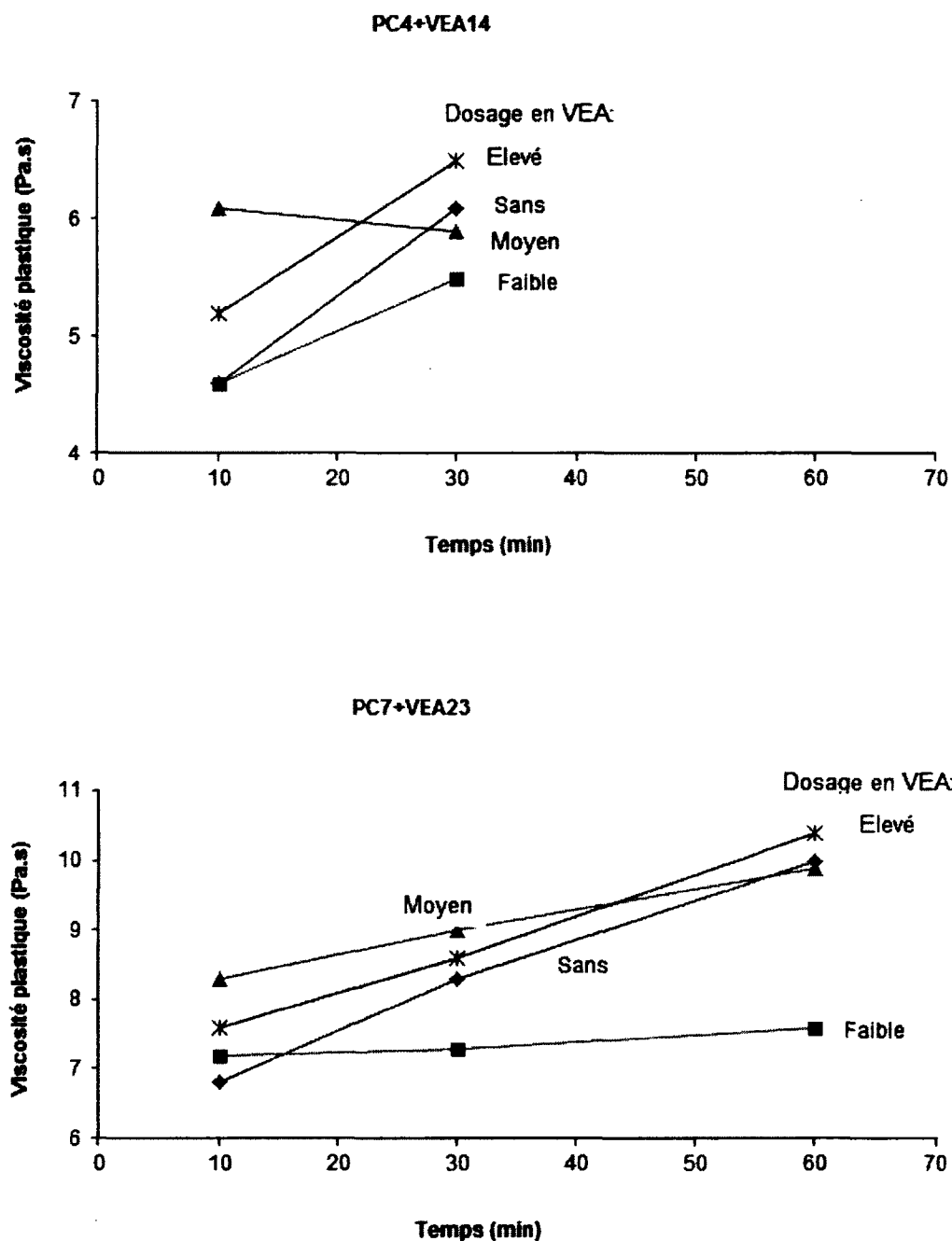
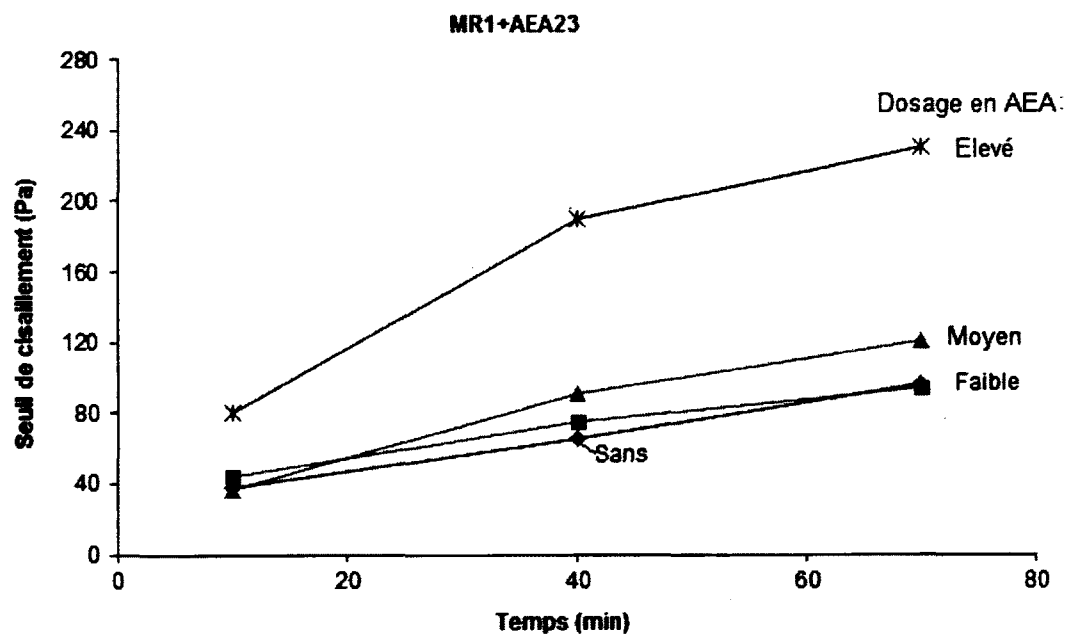
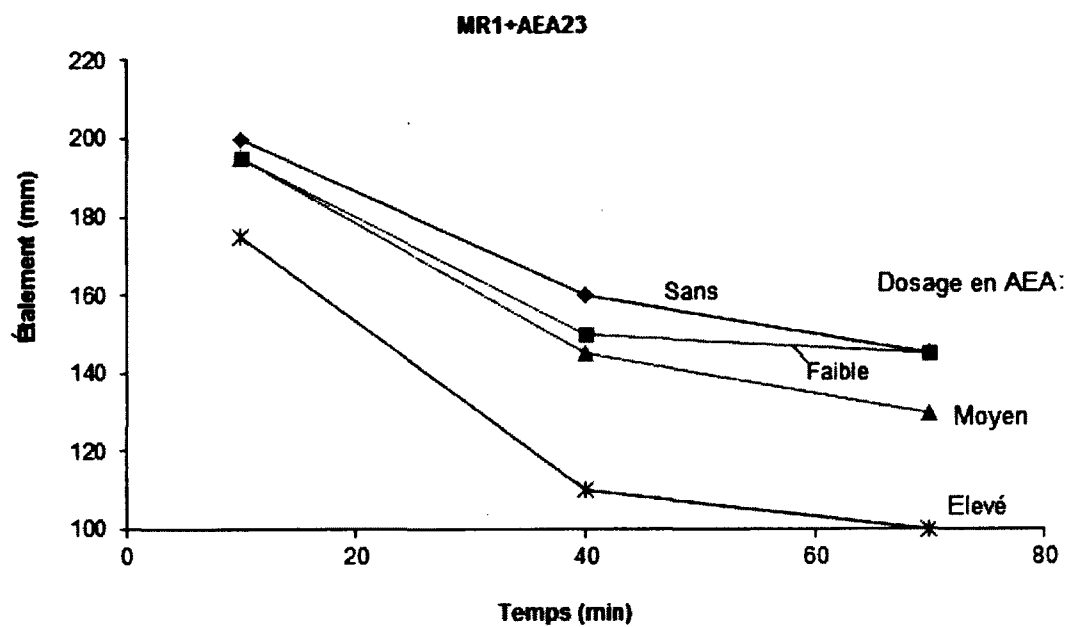
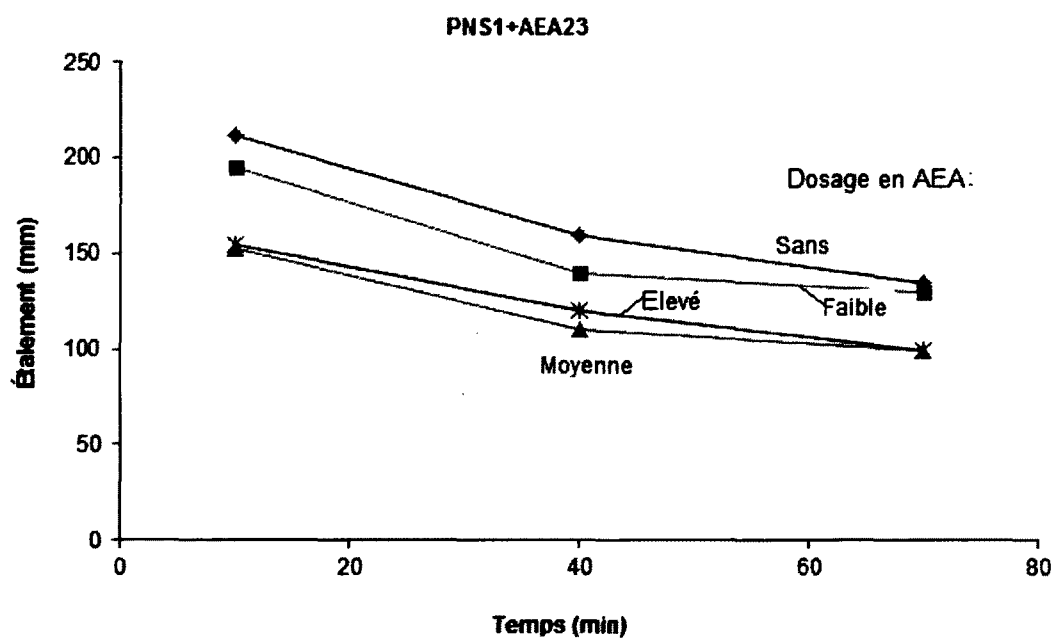
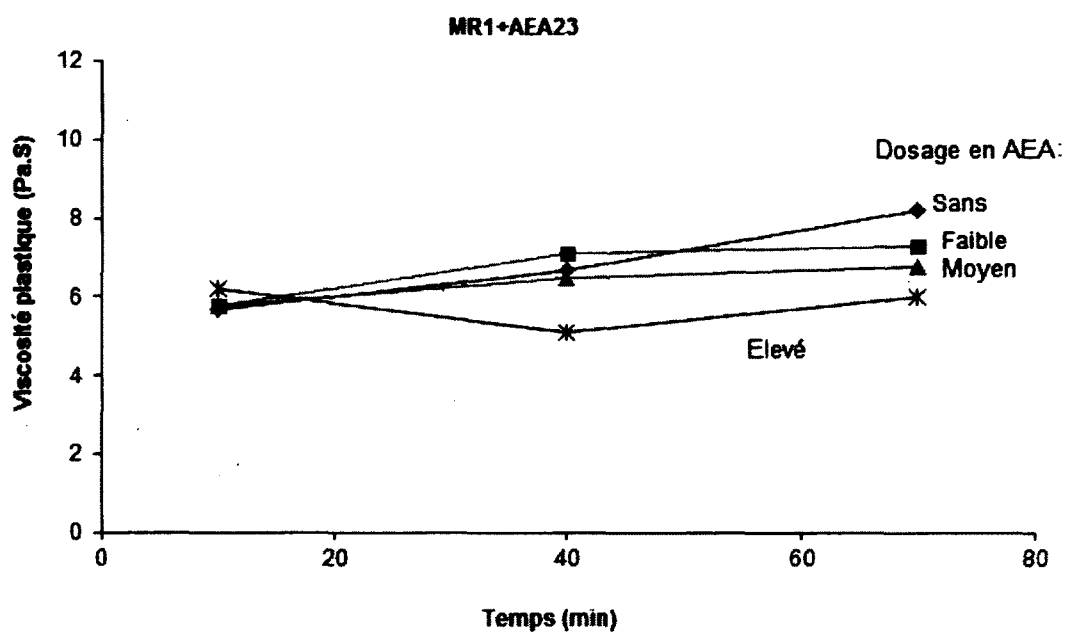


Fig. A.2 – Variation des propriétés rhéologiques (étalement, seuil de cisaillement et viscosité plastique) en fonction du temps pour le MBE correspondant au BAP pour la préfabrication (MBE-BAP-P) avec différents dosages en VEA





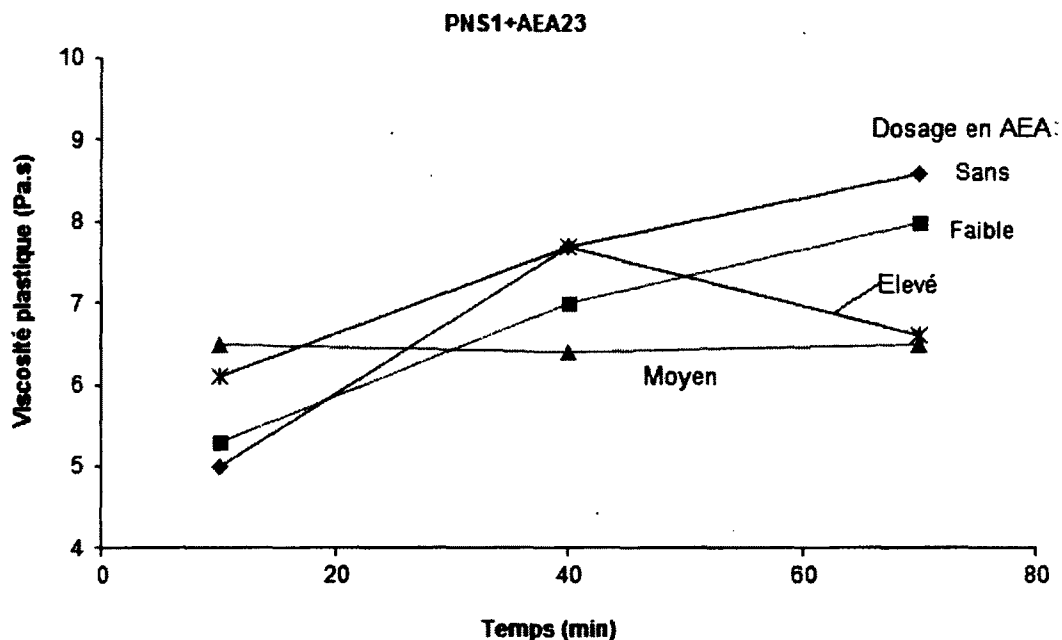
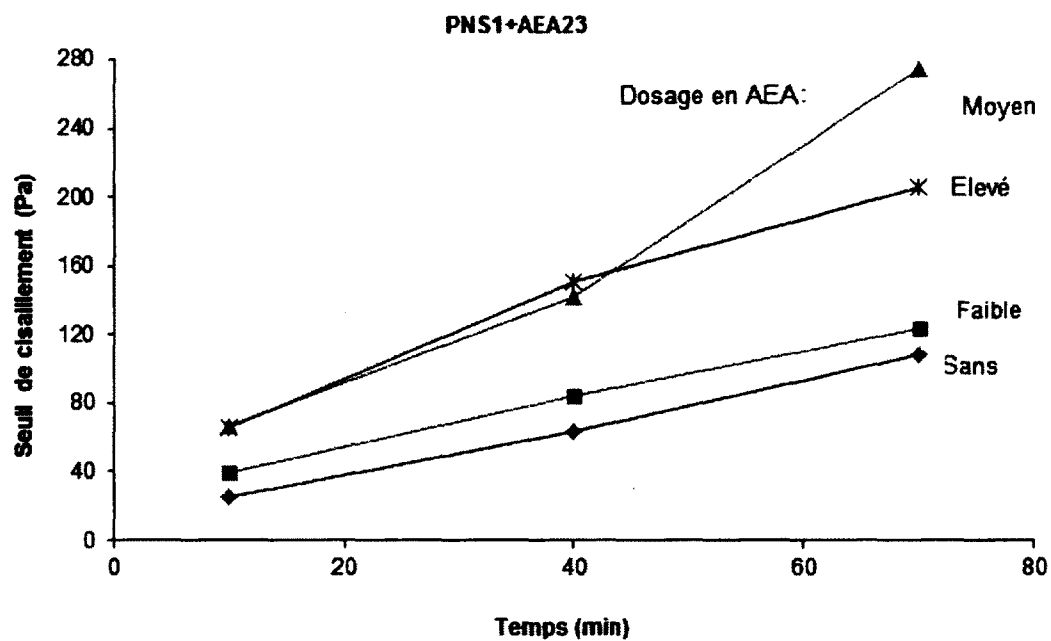
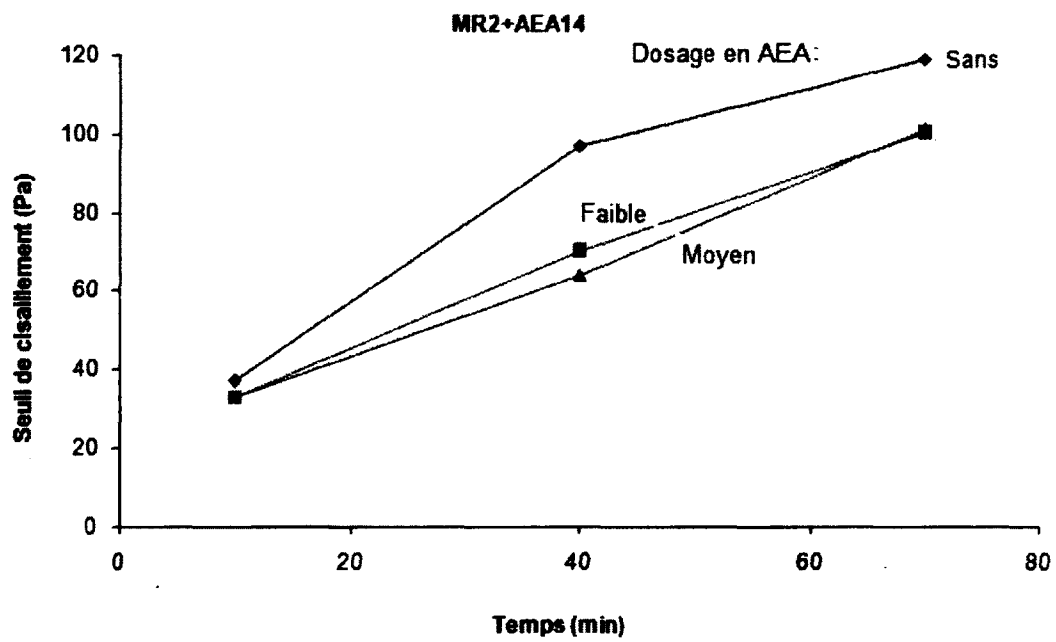
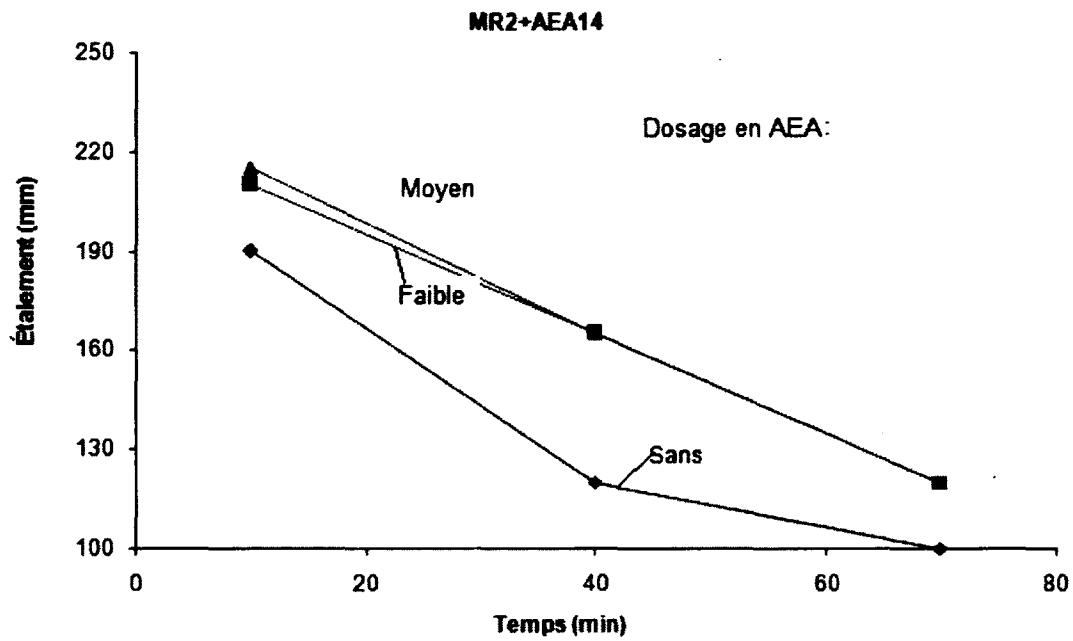
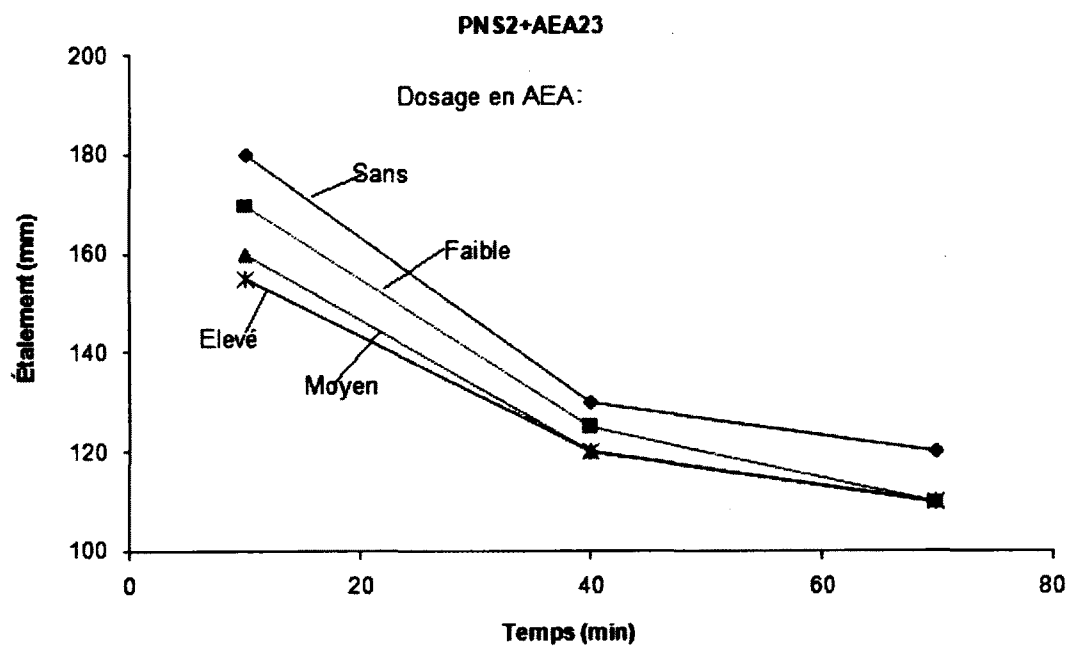
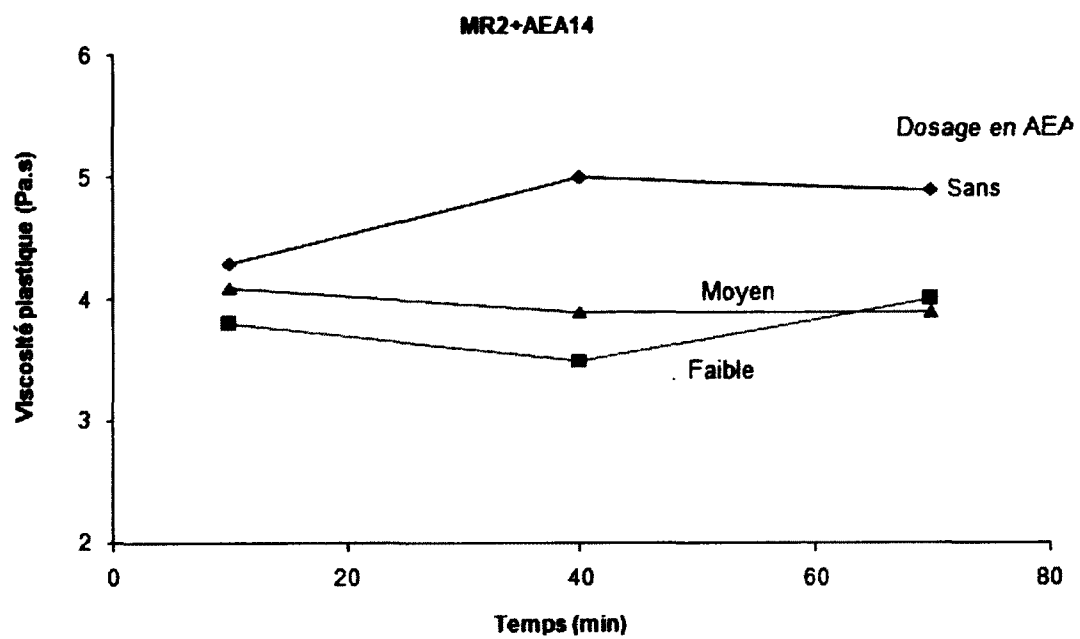


Fig. A.3 – Variation des propriétés rhéologiques (étalement, seuil de cisaillement et viscosité plastique) en fonction du temps pour le MBE correspondant au BSAP pour l'infrastructure (MBE-BSAP) avec différents dosages en AEA





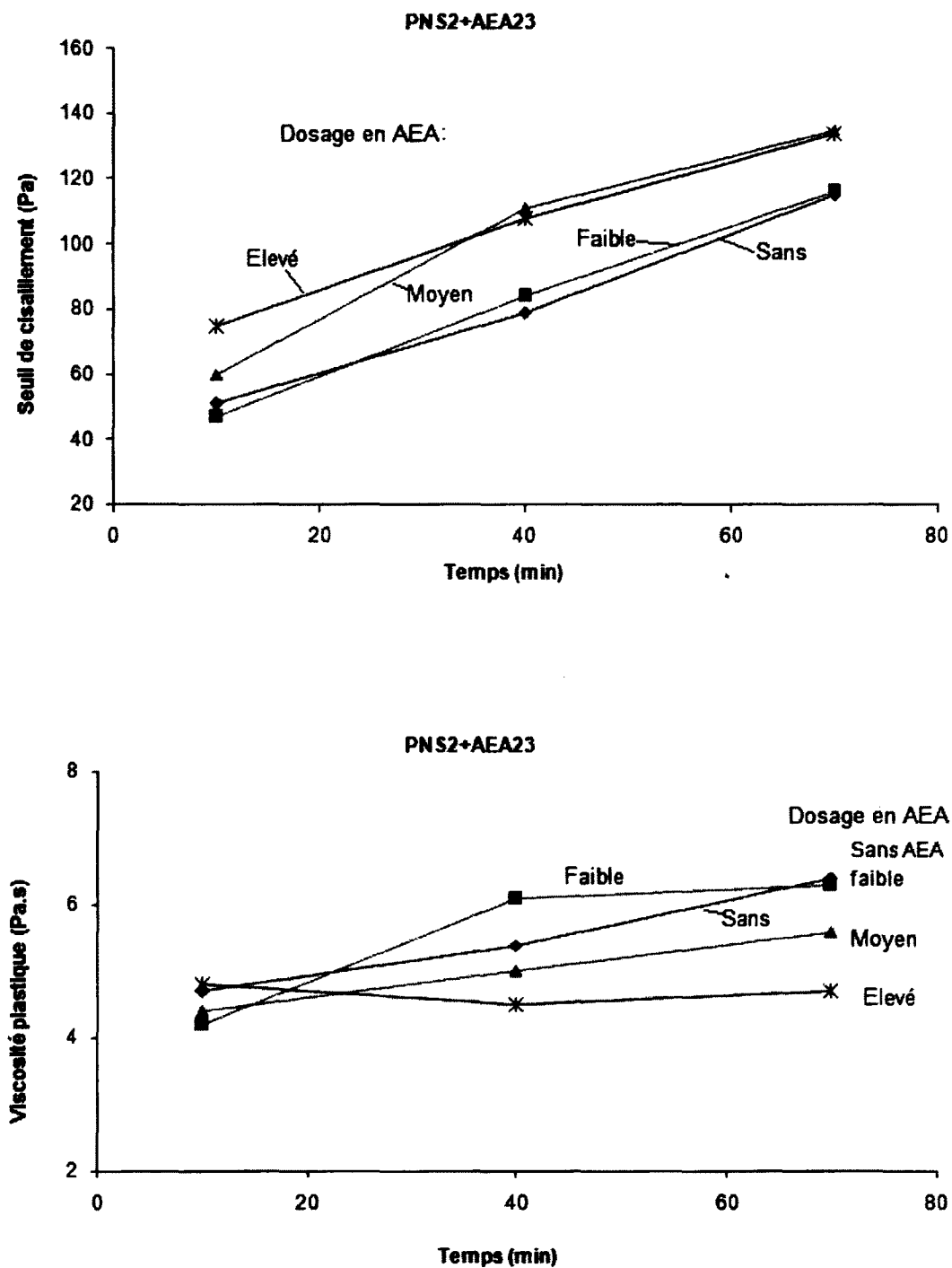
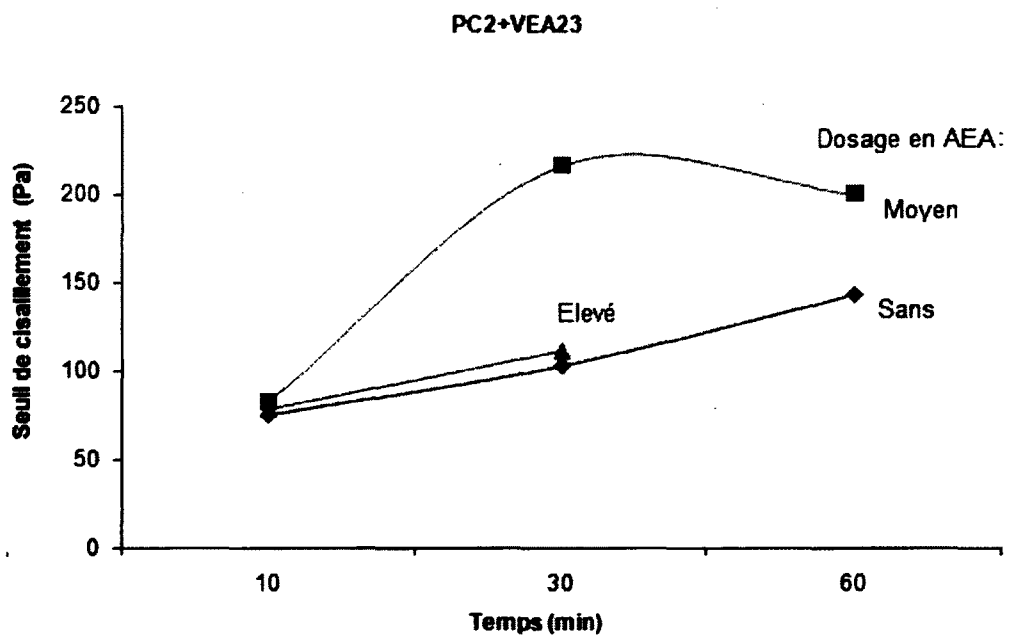
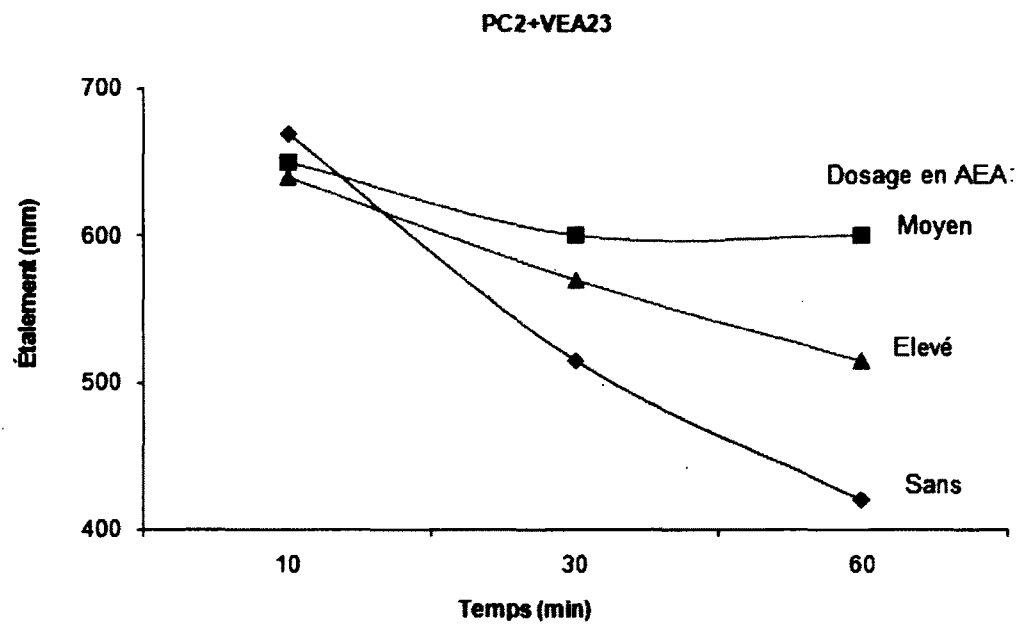
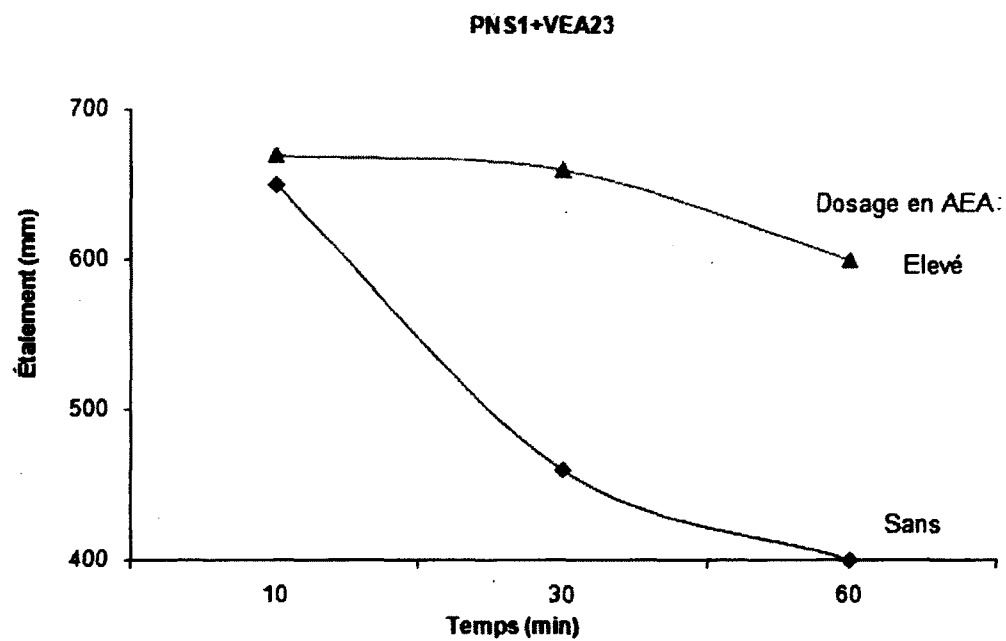
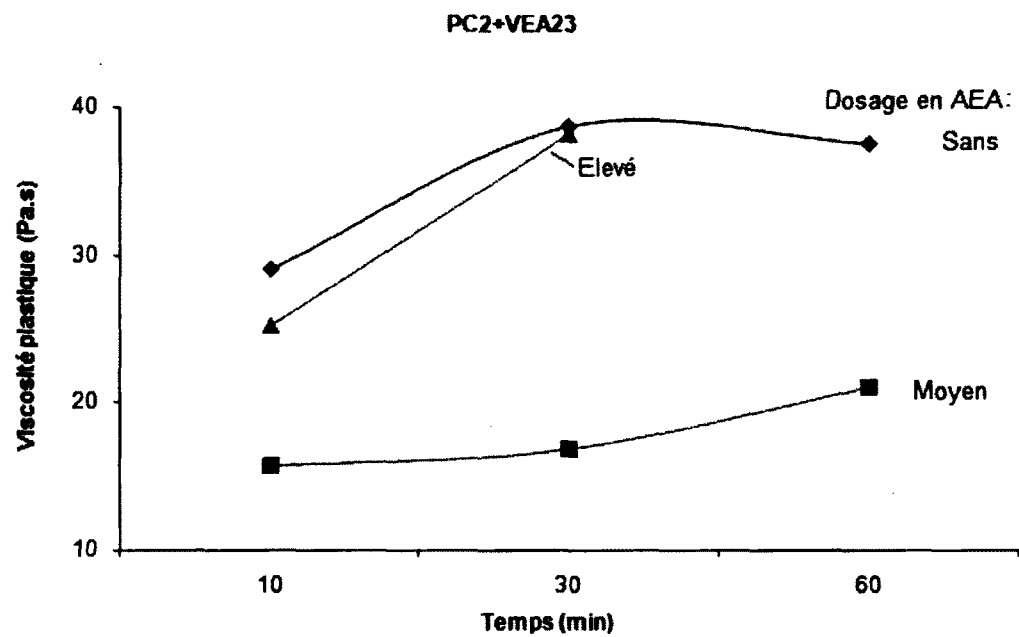


Fig. A.4 – Variation des propriétés rhéologiques (étalement, seuil de cisaillement et viscosité plastique) en fonction du temps pour le MBE correspondant au BM avec une fluidité identique au BSAP des différents dosages en AEA





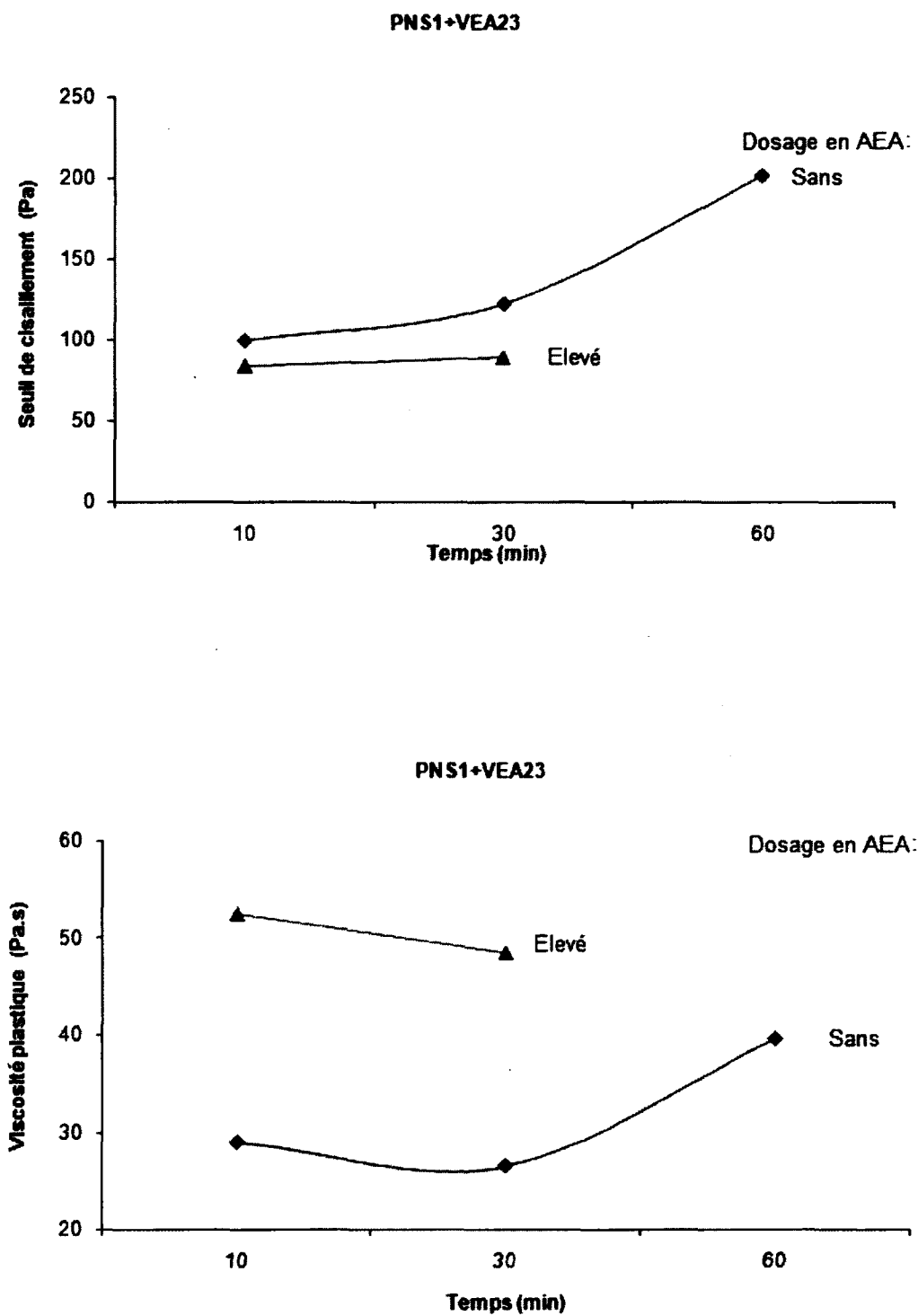


Fig. A.5 – Variation des propriétés rhéologiques (étalement, seuil de cisaillement et viscosité plastique) en fonction du temps pour le BAP pour la construction des bâtiments